

中国科学技术大学

博士学位论文



城市环境下无人驾驶车辆运动控制方法的研究

作者姓名：赵盼

学科专业：检测技术与自动化装置

导师姓名：梅涛 研究员

完成时间：二〇一二年十月八日



Y2254628

University of Science and Technology of China
A dissertation for doctor's degree



Research on Motion Control Approaches of Autonomous Vehicle in Urban Environments

Author's Name: Pan Zhao

speciality: Detection Technology and Automation Equipment

Supervisor: Professor Tao Mei

Finished time: October 8, 2012

中国科学技术大学学位论文原创性声明

本人声明所呈交的学位论文,是本人在导师指导下进行研究工作所取得的成果。除已特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名: 赵盼

签字日期: 2012.11.6

中国科学技术大学学位论文授权使用声明

作为申请学位的条件之一,学位论文著作权拥有者授权中国科学技术大学拥有学位论文的部分使用权,即:学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅,可以将学位论文编入《中国学位论文全文数据库》等有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。本人提交的电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

☒公开 ☐保密(____年)

作者签名: 赵盼

导师签名: 张强

签字日期: 2012.11.6

签字日期: 2012-11.6

摘要

无人驾驶车辆是一种移动机器人，其关键技术涉及到环境感知、模式识别、导航定位、智能决策、控制工程以及计算机技术等众多学科的前沿研究领域，是验证机器感知与认知理论和关键技术的关键实验平台，同时其技术单元也可以帮助人类驾驶员进行车辆自动驾驶工作，并以此提高行车的安全和效率。

在无人驾驶车辆的单元技术中，在未知路况条件下的高速高精度轨迹跟踪自适应控制一直是研究的重点和难点。针对城市综合环境下无人驾驶车辆的运动控制问题，本文在传统方法的基础上，根据车辆控制模型的特殊性和城市环境的复杂多样性，提出了一些新的解决方案，以提高算法的适应性。具体的研究内容包括以下几个方面：

1) 对无人驾驶车辆控制理论的相关概念，对国内外研究成果进行分析，了解汽车的运动特性及建模仿真方法，了解不同环境对车辆运动的影响，了解驾驶员的驾驶过程，从人对车辆的控制方式来思考无人驾驶控制所要面临问题。

2) 对城市道路的分类和各自特点进行了归纳总结，明确了无人车在各种道路环境所要完成的任务；以“智能先锋”无人驾驶车辆平台为基础，介绍了平台的感知系统、决策系统、控制系统及执行机构。结合无人驾驶车辆在城市道路运动控制方面遇到的关键性问题提出控制系统采用的研究策略和设计思想。

3) 分析车辆纵向动力学，研究车辆纵向控制方法。分析总结“智能先锋”动力传动特性和制动力学特性，参考实际驾驶员对车辆的速度控制行为，结合专家控制方法，提出专家 PID 控制算法，根据实际驾驶员的驾车经验建立专家规则，解决在传动系统高度非线性和复杂的纵向干扰条件下的控制精度的问题，提高速度控制的鲁棒性，实现无人驾驶车辆在城市道路行驶的速度控制。

4) 研究基于车辆操作动力学的横向控制方法。建立车辆操纵动力学模型，进行车辆操纵动力学和轮胎侧向力学分析；在“预瞄—跟随”理论的控制模型和传统 PID 控制方法的基础上设计一种基于小脑模型神经网络与 PID 复合的无人驾驶车辆横向控制算法，使系统能够自动补偿被控模型和输入信号发生的非预知的变化，解决由于模型不精确或存在其他变化因素带来的控制不确定性问题，从而使无人车能够灵活的在各种道路环境实现稳定准确的道路跟踪行驶。

5) 研究车辆高速行驶时的运动学特性，联合考虑纵向控制和横向控制之间相互制约关系，根据车辆操纵稳定性及舒适性的要求建立了最高速度和最大转向角的约束规则，以保障车辆行驶安全性。

本文最后在真实的城市道路环境中，以“智能先锋”无人驾驶车辆为实验平

台,验证了上述研究内容的可行性和有效性,并根据实验结果总结了目前控制系统设计方法的优势和不足,也对进一步的研究提出了展望。

关键词:无人驾驶车辆 路径跟踪控制 速度跟踪控制 专家 PID 控制 小脑模型
神经网络

ABSTRACT

The autonomous vehicle is one kind of mobile robots, whose key technologies are related to frontier research fields of environmental perception, pattern recognition, navigation and positioning, intelligent decision-making, control engineering, computer technology, and many other disciplines. It is not only the best experimental platform to exam the cognitive theory and the critical technology, but also, at the same time, its unit technology can help humans drive cars automatically to improve the driving safety and efficiency.

In the technology of autonomous vehicle, the high speed and high precision self-adaptative control of trajectory tracking in unknown traffic conditions is always the key difficulty. To deal with the problems of autonomous vehicle's motion control in urban environment and to improve the known traditional method, this paper presents some new solutions dealing with the specific characteristics of vehicle control model and complex diversity of city environment, to enhance the adaptability of the algorithms. Our research includes the following several aspects, specifically:

1) We first briefly introduce the concept of vehicle control theory and the state-of-the-art international and domestic achievements. This includes the understanding of vehicle's kinetic characters with its modeling and simulation, the understanding of the environmental influence on the vehicle's and the understanding of the driving process upon considering the way that human drives.

2) This paper also summarizes the classification of urban streets and their respective characteristic, in a way that the tasks that the autonomous vehicle faced in various conditions clear. With the so-called "Intelligent Pioneer" as a basis platform of the autonomous vehicle, we introduce the platform of sensing systems, decision-making systems, control systems, and implementing agencies. We propose a control system's research strategy and design idea that combine the key problems of autonomous vehicle's motion control in urban environment.

3) We analyze the vehicle longitudinal dynamics and study the method of vehicle longitudinal control. The power transmission characteristics and brake mechanical properties of "Intelligent Pioneer" is analyzed and summarized, according to the behavior of driver's speed control, combining the expert control method. We develop the expert PID control algorithm, that establishes expert rules according to

the driving experience, solves the problem of control accuracy when the transmission system is highly nonlinear and the longitudinal interference is too complex, so that the robustness of speed control system can be improved and the goal of speed control of autonomous vehicle's driving in urban road can be established.

4) We study the method of lateral control for vehicle operation dynamics. The model of vehicle operation dynamics is established for the research of vehicle operation dynamics and tire lateral mechanics. Upon the formally established theory and traditional PID control, this paper presents a new autonomous vehicle's lateral control algorithm based on a composite of the CMAC and PID control. This enables the system to compensate automatically when the model and input signal occur changes unpredictability, such that the autonomous vehicle can drive steadily and accurately in any kind of urban environments.

5) We study the kinematic characteristics when a car travels at a high speed. We consider the restricted relationship between vertical control and lateral control federatively and establish the constraint between the highest speed and biggest steering angle at the request of stability and comfort, to ensure the safety of the vehicles.

At last, this paper takes "Intelligent Pioneer" as the experimental platform to check the feasibility and to examine the research above in the real urban environment. We also summarize the advantages and shortages of control system's design procedures. Future research directions are also proposed.

Key Words: Autonomous Vehicle, Path Tracking Control, Speed Tracking Control, expert PID control, Cerebellar Model Articulation Controller

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题背景及意义	1
1.2 无人驾驶车辆发展现状	2
1.2.1 国外无人驾驶车辆的研究现状及分析	2
1.2.2 我国无人驾驶车辆的研究现状及分析	6
1.3 无人驾驶车辆控制理论的相关概念及研究现状	7
1.3.1 无人驾驶车辆运动学和动力学分析及建模方法	7
1.3.2 驾驶员模型的研究	8
1.3.3 无人驾驶车辆的控制方法	8
1.3.4 无人驾驶车辆控制理论的国内外研究现状	9
1.4 本文主要研究内容及研究意义	11
第二章 城市环境下无人驾驶车辆控制系统的设计分析	13
2.1 城市环境中无人驾驶车辆所面临的问题	13
2.1.1 城市道路环境特点	13
2.1.2 驾驶员在城市道路中行驶所要完成的任务	14
2.1.3 结合驾驶员驾驶行为提出无人驾驶车辆所面临的问题	15
2.2 “智能先锋”无人车体系结构及功能	15
2.3 控制系统设计方法和设计指标	20
2.3.1 行驶路径的表述	20
2.3.2 纵向控制	22
2.3.3 横向控制	23
2.4 本章小结	25
第三章 车辆纵向动力学及纵向控制方法	27
3.1 车辆纵向动力学分析	27
3.2 无人驾驶车辆纵向控制设计思想	30
3.2.1 速度控制驾驶员模型	30
3.2.2 “智能先锋”纵向运动特性分析	30
3.3 建立基于规则的专家 PID 速度控制系统	33
3.3.1 专家控制理论	33
3.3.2 专家 PID 控制原理	36
3.4 速度控制的专家 PID 控制设计	37
3.4.1 油门控制	37
3.4.2 制动控制	40
3.5 速度控制测试实验	40
3.6 本章小结	46
第四章 车辆横向动力学及横向控制方法	47

4.1 车辆横向控制的数学模型分析	47
4.1.1 车辆横向动力学模型	47
4.1.2 求解问题的状态空间描述	51
4.1.3 相对道路的车辆运动学模型	52
4.2 车辆横向控制系统分析	53
4.2.1 状态反馈控制设计	53
4.2.2 输出反馈	54
4.2.3 PID 控制闭环系统	55
4.3 基于小脑模型神经网络与 PID 复合的自适应控制器设计	59
4.3.1 CMAC 的结构与原理	59
4.3.2 CMAC 的学习算法	61
4.3.3 CMAC 与 PID 的复合控制	62
4.3.4 CMAC 与 PID 的复合控制仿真结果	64
4.3.5 CMAC 与 PID 复合控制的实验验证	67
4.4 本章小结	70
第五章 “智能先锋”控制系统实验分析	71
5.1 实验设计	71
5.2 面向城市道路的无人驾驶车辆行驶安全性讨论	72
5.2.1 高速过弯或换道的行驶安全性	72
5.2.2 路径跟踪的安全转向约束	73
5.2.3 安全速度约束	76
5.3 实验结果及分析	77
5.4 本章小结	87
第六章 结论	89
参考文献	91
致谢	99
在读期间发表的学术论文与取得的研究成果	101

第一章 绪论

1.1 课题背景及意义

社会不断发展,科技日益进步,我们的社会已经充斥着各种“机器智能”,从我们家中帮助清洁的吸尘器机器人,到飞机在变化莫测的天气中安全降落的计算机控制。跨越上个世纪,我们目睹越来越多用以替换“苦力”的设备,如洗衣机,微波炉,机动交通工具,以及能够提高生产率和生活便利的个人电脑和信息技术。伴随着这些技术的发展,我们在生活工作中可能受到的危害已大大降低,从本质上讲,我们的技术进步一直专注于减少发生意外及创伤,并保护我们的财产。

然而,驾驶汽车作为一种日常行为,既枯燥繁琐又充满危险。每时每刻我们都要关注车辆行驶时周围环境的变化情况,我们会面临道路条件极差的危险,我们可能会质疑其他驾驶员的技能或判断,甚至我们得关注自己的疲劳或失误。事实上,这些沉闷的驾驶行为和一些熟练驾驶经验,可能会导致驾驶员注意力上的疏忽,从而发生意外事故。驾驶员的失误是绝大多数事故发生的主要原因,而这些事故中大约一半的情况下,是由于驾驶员反应的延迟所致。此外,随着汽车使用率的增加,由于人类感知和控制能力的局限性,当成千上万的车辆在同一时间共享同一段道路时,必然导致交通堵塞。交通堵塞,影响我们的生活质量,并且污染空气损害公众健康。当车辆在道路上通行时,我们更加关心其通行的安全和速率等因素。

从 2000 年开始,随着人工智能、模式识别、计算机视觉、电子等学科的发展,车辆已经不再是一个复杂的机械结构。它结合了许多电子控制系统,集成了许多先进的科学研究成果。电子发动机控制系统的采用有效地提高了汽油机的效率,ABS 系统的应用改善了车辆的安全性和稳定性,主动悬架的应用减轻了人们乘坐车辆时的不适感,并且使车辆的行驶变得更加平稳。但我们更希望的是汽车能够具有自动规划行驶路径,自动识别道路、自动操纵驾驶等先进功能,使驾驶员能够从枯燥繁琐的驾驶行为中解脱出来,使得驾驶更加安全,无人驾驶车辆技术得到了人们的重视。城市综合环境信息量大,复杂多变,通过开展城区较大范围内和复杂多变交通环境下的无人车自动驾驶关键技术的研究,对增强无人驾驶车辆对交通环境的感知识别能力,提高车辆对周围信息的决策控制能力具有重要促进和引导作用。在无人驾驶车辆平台上进行的汽车电子、车辆主动安全技术的研究对提高交通运输能力、减少交通事故、增强车辆的智能性都具有很高价值。

无人驾驶车辆也被叫做智能车辆,是一种智能移动机器人,它涉及到环境感

知、模式识别、导航定位、智能决策控制以及计算机技术等众多学科的前沿研究领域,其研究目标是取代人类驾驶员进行车辆自动驾驶工作,并以此提高行车安全和效率。无人驾驶车辆作为展示计算机科学、模式识别和人工智能技术水平、引领车辆工业未来发展的重要平台,已成为世界发达国家研究的热点。

1.2 无人驾驶车辆发展现状

1.2.1. 国外无人驾驶车辆的研究现状及分析

(1) 美国

国外开展无人驾驶车辆研究的时间始于 1950 年,其技术高速发展是在 1980 年左右。在无人车关键技术的研究中,在研究技术的水平和研究成果的普及应用方面美国都表现为较高的水平。1950 年后美国贝瑞特电子公司研制出全球第一台自主导航车,能够自动在设定的轨道中行驶。在上世纪八十年代,美国开展了自主地面车辆(AVL)项目,主要由美国陆军与国防高级研究计划局(DARPA)合作。该项目开发成功了一辆带有八个轮子的无人驾驶机器人,该机器人在颠簸的地形上行驶较为困难,且较难达到很高的车速。上世纪九十年代,卡内基梅隆大学研究制成了智能车辆 Navlab-V,该车在许多地形上完成了长距离、高速度的自主行驶实验,行驶路程达上万公里(Andrew et al.2008)。上世纪九十年代末美国国防部门开展了 DEMO 系列无人车的研制,在以后的十年时间里,共研究制造出 10 代 DEMO 车型(Shoemaker,C.M.et al.,1998; Albus.J. 2002)。

2003 年开始美国 DARPA 组织在 2003 年至 2007 年之间举办了三次无人驾驶车辆竞赛,目的是验证无人车在复杂变化的环境中的自动行驶能力,以推动无人车技术的迅速发展。2004 年初在美国的 Mojave Desert 举办了首届 DARPA 山路地区挑战赛,总里程 228 千米,卡内基梅隆大学的“沙漠风暴”无人车以自动驾驶里程 11.78 千米的成绩获得第一名。2005 年下半年, DARPA 组织第二届无人车大赛,总里程为 212 千米,此次比赛中有 23 组车队参与。最终,Stanford 大学的 Stanley 无人车获得了第一名,总共用了近 7 个小时的时间,平均速度达到 8m/s(Thrun, S.et al.,2006),其余完成比赛的 4 支车队用时更长。第三届 DARPA 城市挑战赛 2007 年在美国洛杉矶周围的一个军事基地举行,总行程 96 千米,最终 6 辆车完成了总赛程, Carnegie Mellon 名为“BOSS”的无人车取得第一名,最高行驶车速为 48km/h。该无人车以雪佛兰公司 Tahoe 为平台,配备了 GPS/INS 定位仪、车辆里程表、11 个激光测距仪、5 个 Millimeter-wave 雷达和 2 个视觉相机(Chris Urmson et al., 2008)。Stanford 大学与大众公司合作研制的“JUNIOR”无

人车在 4 小时 29 分的时间内完成比赛,并取得第二名 (Michael Montemerlo et al., 2008)。弗吉尼亚州大学的无人车“ODIN”以 4 小时 36 的时间完成比赛,并取得第三名 (Andrew Bacha et al., 2008)。在此次大赛中,感知能力相对较强的无人驾驶车辆在比赛中体现出较强的优势。

2010 年, Google 公司研制的无人驾驶车辆开始了实际城市道路的行驶测试, 总共有 7 辆车参加了这一系列的测试 (Markoff J. 2010)。Google 公司的无人车具有完备的感知能力和高水平的人工智能, 可以指引车辆的正确行驶。传感器包括相机, 三维激光雷达, 毫米波雷达, 利用这些设备, 车辆可以自动地识别出信号灯、行人或者车辆等其他障碍物。同时, Google 公司的无人车可以运用谷歌地图对车辆进行导向, 在自主行驶条件下, 无人车已行驶了近两千公里。

(2) 欧洲

欧洲各国在无人驾驶车辆方面也做了很多研究工作, 走在世界前列, PROMETHEUS 计划、PReVENT 计划等在世界范围内影响很大。

EUREKA 的 PROMETHEUS 计划全名是 PROgramme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety, 是 1987 年至 1995 年欧洲无人驾驶车辆领域最大的研发项目。Ernst Dickmanns 是 20 世纪 80 年代无人驾驶汽车先驱, 1994 年他主持研制的双胞胎机器人车辆 VaMP 和 VITA-2 在巴黎的多车道高速公路上行驶了 1000 多公里, 在车流繁忙情况下最高车速达到 130 公里/小时, 并能自主完成跟踪行驶、变道和超车 (Shladover, S.E. et al., 1991)。1995 年 Dickmanns 重新设计了 S 级奔驰自动驾驶车辆, 完成从德国慕尼黑到丹麦哥本哈根 1600 公里的旅程, 最高时速超过 175 公里/小时 (Brusaglino, G. 1992)。PROMETHEUS 取得的成功是之后欧洲开展无人驾驶车辆研究的基础。

PReVENT 是欧盟委员会资助的欧洲汽车行业计划, 项目总预算超过 €55,000,000, 从 2004 年 2 月开始到 2008 年 1 月共 4 年时间, 涉及 50 多个合作单位, 包括了世界知名的汽车生产厂商和研究机构。项目旨在通过开发示范主动安全技术与应用, 从而促进道路安全, 通过使用车载系统感知事故发生的类型和性质, 同时考虑驾驶员状态, 来避免或减轻事故。PReVENT 项目作为主动预防道路安全最大的首创之一, 提出了三个总体概念: 虚拟安全带, 时间-碰撞时间表, 智能车辆的三层架构——感知, 决策, 执行。

1998 年 6 月意大利帕尔玛大学的 ARGO 智能车开展了路程近两千公里的大范围行驶。该实验车的核心是视觉检测车道线技术, 采用的是 GOLD (Generic Obstacle and Lane Detection) 系统, 检测原理是单目视觉的反透视变换, 使用立体视觉系统检测道路前方的障碍物 (Betrozzi, M. et al., 2000)。2010 年 10 月 28 日, 帕尔马大学 Vislab 实验室研制的试验车使用绿色能源作为动力, 历时 3 个多月,

行驶 13000 多公里，只用极少数的人工干预，成功抵达上海(Bertozzi M, et al., 2010)。

2006 年 5 月，欧洲第一届陆地机器人试验赛(即无人车大赛) (European Land-Robot Trial, ELROB) 在德国 Hammelburg 的军方训练场举行。该赛事类似于 DAPAR 的沙漠挑战赛，比赛全程达到 200 多公里。据德国军方介绍，除来自德国的 12 支队伍以外，还有其他 5 个国家的车队参加了此次比赛。这些车队都是非美国国家，比赛不允许密集使用 GPS。

2007 年 9 月，第二届 ELROB 在瑞士的 Ticino 举行，来自 5 个国家的 13 个队伍参赛，主要考察机器人在安全，消防，民防和灾难控制领域的应用。此次比赛设置了 4 项比赛方案：8 支队伍参与了非市区环境下寻找危险品区域，10 支队伍参与了城市环境下在拥挤集市搜寻简易爆炸装置，2 支队伍参与了与无人机无人车联合作战，7 支队伍参与了城市自主侦察、治安巡逻。

2008 年 6 月，第三届 ELROB 由德国联邦武装部队主办，来自德国、法国、芬兰、意大利等 10 个国家的 20 多支队伍参赛。此次比赛主要考察无人驾驶系统的短期作战能力，比赛场景尽可能接近实战环境。

2009 年 5 月，第四届 ELROB 比赛在波兰举办，仍以考察机器人在安全，消防，民防和灾难控制领域的应用为主。此次比赛也设置了四个比赛项目：在乡村环境下收集环境信息，检测并报告目标信息；在城市环境下搜索预先指定的区域，发现，报告并监测运动物体；沿着预先指定路线自主导航；在两个已知地点间往返运输。

2010 年 5 月，第五届 ELROB 比赛在德国 Hammelburg 举办，此次比赛以考察军事应用为主，并着重考察车辆在夜间的表现。比赛项目包括在目标位置做侦察和监视、在混合地形条件下的车辆移动、在混合地形条件下来回运送等。

英国于 20 世纪初期已经在一些机场布置智能车辆为旅客服务。同时，英国政府发出声明，在以后的几十年内，将为无人驾驶车辆建造专门的道路，同时，为了兼容已有的道路，将在已建造道路中划分出新的智能车辆专用道。相关研究人员表示，智能车辆先进的主动安全等技术将使得城市交通更加顺畅，大大减少了事故的发生率。在新能源的利用上，无人驾驶车辆也走在了现有车型的前列。

“赛卡博”(Cycab)是由 INRIA 公司研究成功的，这家位于法国的公司总共花费了近 9 年的时间才将这辆外形看起来像高尔夫球车的无人驾驶车辆推出市场。在演示中，乘客只需要在“赛卡博”的人机交互界面上输入目的地的地址，通过强大的卫星定位系统与智能传感器与人工智能技术，该车可以安全地到达目的地。值得一提的是，与普通的民用 GPS 系统不同的是，Cycab 的定位精度可以达到 0.1 厘米。

欧洲各国进行无人车辆研制,也是以城市道路环境等结构化道路情况下的应用居多。与美国 DARPA 比赛不同的是,欧洲 ELROB 是军用民用主题间隔,综合考虑了消防、搜救、运输、夜视环境等等,而且比赛不允许密集使用 GPS。这与我国 2010 智能车未来挑战赛提出的不允许使用 GPS 的目标一致。

(3) 日本

日本的交通部门从上世纪九十年代开始实施先进安全车辆(ASV)计划。目前,日本对 ASV 开发已经走过了三个阶段,第四阶段也刚刚结束。第一阶段是 1991 年~1995 年,由政府编列预算并由各大汽车企业进行乘用车四大类 20 项先进安全系统技术的研发,此阶段主要考察在车辆上安装高科技装置的可能性、如何应用这些技术及他们能减少交通事故的程度;第二阶段是 1996 年~2000 年,适用对象增加了商用车,系统技术也增加了 6 大类 32 项,开始对 ASV 车辆实用化进行开发研究,开发出 35 辆 AVS 车辆进行展示,对安全理念进行整理,确认了开发的方向,对事故降低程度进行了验证;第三阶段是 2001 年~2005 年,这一阶段主要对 ASV 车辆的普及化进行探讨,并开发新技术,主要表现在提高 ASV 车辆的社会可接受程度,开发先进的自动驾驶车辆,并将先进的通信技术应用到 ASV 中;第四阶段是从 2008 年~2010 年,本阶段除将正式普及此前就投入使用的通过摄像头和雷达等的主动预防事故系统之外,还将力争实现上一阶段实施的利用车间无线通信技术来防止事故的“信息交换型驾驶辅助系统”的部分实用化(冢田幸广.2007; Kamiya,H.1996)。

日本还曾成功研制出适合城市环境的无人驾驶公共汽车,被称为“新一代城市长途交通系统”。这套公共交通工具自动驾驶系统也包含在日本现在着力发展的智能交通系统当中,它主要由车道跟踪、安全防碰撞驾驶、集群行驶及其管理等几方面组成。这套系统的主要原理是运用磁性装置进行导航。在车前,配备有毫米波雷达,带有红外功能的相机,激光雷达等装置,利用这些传感设备,可以轻松对车外环境进行建模,这样,通过车辆的中枢电脑,就可以对车辆的速度、行驶状态进行控制,当障碍物进入车辆的安全行驶范围内,车辆就会减速或者制动刹车。中枢管理系统通过安装在车门的摄像机和雷达等传感器,在靠站停车时,对乘客的上下车情况进行检测,控制车门的开启与关闭,车辆的启动与停止。这套公共交通系统的最高运行速度达到 25 米/秒,在道路较弯曲时,运行速度可达 10 米/秒。

同时,日本的主要汽车制造商,如 Honda, Nissan, Toyota 等,也对车辆的主动安全系统大为关注并开展了具体的研究,其中包括:车辆感知模型系统、车辆主动自定位系统、车辆跟随系统、驾驶员面部检测系统和夜间行车系统等。日本的智能公路(Smart Way)研究计划中指出,将智能车辆中的关键技术例如跟

随车道,安全行驶通过路口、主动避碰和保持车距应用到普通车辆中。

提出车辆上采用诸如:防止车辆越车道线、路口安全通过、检测行人和车辆跟随等技术。二十一世纪初到二十一世纪一零年代,在一个已有行驶实验计划的基础上,日本决定在全国范围内开展智能道路计划。日本的无人驾驶车辆技术主要是将智能车的关键技术运用到现有的交通系统中,而对于车辆的自主决策、智能路径规划则关注较少。

1.2.2 我国无人驾驶车辆的研究现状及分析

智能移动机器人的研究在我国兴起于二十世纪八十年代,相对于发达国家来说,时间较晚。在1980年,“遥控驾驶的防核化侦察车”由国家立项,并有三家单位参与了研究制造,三家单位分别是哈尔滨工业大学、沈阳自动化研究所和国防科技大学。

在第八个五年计划期间,我国研制成功了ATB-1(Autonomous Test Bed-1),它由北京理工大学、浙江大学、国防科技大学、清华大学、南京理工大学联合研制,是我国第一辆自主行驶测试样车,该车速度可达二十一公里每小时。在ATB-1的基础上,第九个五年计划期间,ATB-2顺利研制成功。该车的功能大大加强,在试验中,直线速度最高可达二十一米每秒,平均行驶速度为十米每秒。该车还附带遥感控制等功能。在2005年,第三代自主行驶车辆Autonomous Test Bed-3顺利面世,该车的环境认知、障碍物检测及轨迹跟踪的能力大大加强。

国防科技大学研制的无人驾驶汽车—红旗CA7460也是国内高水平的自主车辆驾驶平台,其最高的速度可达47米每秒,并且可以依据前方障碍车辆的情况,自动更换车道;清华大学研究制成的无人驾驶车辆——THMR-V(Tsinghua Mobile Robot),最高速度达到42米每秒,并且,车辆可以选择驾驶模式,可选模式有高速路和城区公路两种;首辆应用在普通城区中的无人驾驶车Cyber C3,是由上海交通大学与欧洲科学研究机构共同合作研制的;西安交通大学著名的无人驾驶车辆平台—Springrobot,在国内也具有领先水平,其在车道线检测、行人检测技术上拥有较高水平等等。

2008年,国家自然科学基金委员会启动了“视听觉信息的认知计算”研究计划项目,该项目的主要内容是以无人车为验证平台,进行视听觉认知计算理论研究,在该项目的支持下,2009年至2011年分别举行了三届无人驾驶车辆大赛。该比赛大力推动了无人车领域关键技术的研发。先后有南京理工大学、武汉大学、湖南大学等我国早期开展无人车研发的科研机构组成无人车车队参与了大赛。2010年,中国科学院合肥物质科学研究院研制的无人驾驶车辆——“智能先锋”取得比赛第一名(Pan Zhao,et al.,2011),并在2011年的比赛中获得第三名的好成绩。

绩(Tao Mei,et al.,2012),为本实验室开展面向城市综合环境的无人驾驶车辆关键技术及平台研究奠定了良好的基础。

在国家自然科学基金委员会的支持下,国内无人车技术得到了快速的发展,但是要求车辆实现真正的自主行驶,还需要较长的时间。现在的智能车辆技术,不仅在环境建模方面有所缺陷,无人车的控制水平还急需提高。所以,开展对无人车控制系统的研究十分必要。

1.3 无人驾驶车辆控制理论的相关概念及研究现状

无人驾驶车辆的关键技术包括对车辆行驶环境的感知、对车辆行驶路径的规划、对驾驶行为的智能决策、对车辆的导航定位以及对车辆的自动控制。无人驾驶车辆的控制系统作为智能车辆最底层、最重要的环节,一直受到广大专家学者的重视。目前在无人驾驶车辆控制技术方面还存在以下一些共性问题:在工况大范围变化时,车辆运动出现震荡以及趋于不稳定的情况;精确定点停车和机动控制能力尚显不足;控制算法自适应能力不强,不同的道路环境下需要采用不同的控制算法。为了实现在城市环境下,车道保持、车速控制、定点泊车等任务,还需要提高控制系统的自适应性、鲁棒性和智能性。

车辆控制包括控制车辆按照期望的速度行驶,执行上层系统规划出的期望路径,跟随前方车辆等。无人驾驶车辆是一个非线性的系统,如何设计控制器,以实现高精度的纵向和横向控制是无人驾驶车辆研究所必须解决的重点问题。许多专家、科研人员都对无人车控制系统的研究非常重视,也获得了一定的研究成果。

1.3.1 无人驾驶车辆运动学和动力学分析及建模方法

本文所研究的车辆动力学目的主要是解决车辆操纵稳定性问题。操纵稳定性问题的研究需要我们建立一个表达车辆动力学运动学特性的并且简单通用的数学模型。车辆的运动学模型主要表现车辆的行驶轨迹、车速等几何特性,而动力学模型主要表现车辆在受外界力与力矩作用时速度和方向的变化等物理特性。

关于车辆横向动力学的研究开始于 20 世纪 50 年代,主要通过建立车辆动力学模型的并对其进行开环控制的方法研究车辆行驶时的时域和频域响应。在对车辆的稳态与瞬态特性研究中,可以得到车辆行驶时的各种特征数据。例如:车辆前轮转角为阶跃值时的稳态与瞬态响应,车辆的横摆角速度响应,车辆转向不足或者转向过度等特性。但是,采用此种方法需要建立准确的车辆动力学模型。

20 世纪中期,Whitecomb 和 Milliken(1956)-来自美国 Cornell 大学的研究人员首先开展了车辆“线性二自由度”转向模型的研究;Segel (1956)提出“线性三自

由度”转向模型。随后 Segal (1965)又发表了关于“线性四自由度”模型的著作。1960 年到 1980 年之间, 由于计算机技术的迅猛发展, 更多复杂的车辆模型, 例如有 7 自由度, 14 自由度, 17 自由度乃至更多自由度的模型在许多学者的手中被建立起来。在 1995 年, 一种 18 个车辆状态的模型被建立起来, 它可以准确的描述出车辆轮胎, 发动机, 悬架, 底盘等特性。这个复杂而又精确的模型是由美国加州大学的 Hedrick J.K., Tomizuka M.(1994)提出的。同时, 美国公路安全研究所的 Segal D.J.建立了 15 自由度模型, 国内的杨得军(1997)又开发了 17 个自由度的车辆模型, 它主要应用于模拟驾驶器中。

1.3.2 驾驶员模型的研究

这一段时间, 许多研究人员在车辆操纵稳定性的研究中, 逐渐倾向于对驾驶员模型进行研究, 从高自由度的车辆模型的建立转移到对整个道路-车辆-驾驶员系统的性能研究中, 并且最终得出结论, 车辆操纵稳定性的研究取决于整个道路-车辆-驾驶员系统的特性。基于这个结论, 许多专家学者进行了驾驶员模型和车辆闭环系统的研究。在初始阶段, MuRuer, D.T.(1968)首开先例, 将飞机上的闭环控制技术应用到车辆中。而后, 利用经典控制理论所建立起来的 PID 模型、交叉分类模型、低阶预测模型、最优预瞄控制模型及预瞄最优曲率模型被应用到驾驶员模型的建立中。Reddy, Ellis(1981)在以上成果上, 建立了一种对驾驶员行为进行模仿的模型。这种方法的基本原理是: 假定驾驶员固定视线在车辆前方距离为 l 的地方, 以当前时刻 t 的车辆状态为标准, 估算出一定的方向盘角度, 并查看车辆在行驶到 l 后, 行驶轨迹与预定轨迹的相差程度。如果误差过大的话, 则重新修改方向盘转角, 直到满足误差要求为止, 通过这种逐时刻估算来模拟驾驶员驾驶车辆时的行为。与上述方法类似的是由 MacAdamia 提出的直接优化驾驶员模型的方法。我国学者郭孔辉院士在驾驶员模型的研究中, 也做出了巨大的贡献, 他提出并建立了的预测—跟随系统理论和预瞄最优曲率模型, 方法简单, 准确性高。

1.3.3 无人驾驶车辆的控制方法

无人驾驶车辆的控制方法是该领域研究的关键技术之一。由于车辆模型随着时间的改变, 其系统参数会发生变化, 模型参数极其复杂, 模型方程非线性等特点, 车辆控制方法研究集中在提高控制算法的抗干扰性和自适应性能。车辆的控制任务也从简单的纵向控制、横向控制, 扩展到超车任务、泊车任务。

车辆控制的理论研究方向主要分为汽车横向跟踪控制和纵向跟踪控制两个

方向。在横向控制的研究中出现了许多不同的理论和方法(Bars, R., et al., 2006), 其中包括支持向量基方法(Gao Feng, et al., 2006)、分阶控制方法(Dejun Zhuang, 2007)、传统PID控制方法(Li, Y., et al., 2006)、智能控制方法包括模糊控制(Hessburg, T. 1994; Choomuang R., et al., 2005)和神经网络控制方法(Scott G.M., et al., 1995; Wai R.J. 2003)等。刹车与油门的配合问题和控制精度的抗干扰能力问题是纵向控制所应关注的焦点。

1.3.4 无人驾驶车辆控制理论的国内外研究现状

在 2007 年美国的 DARPA 举办的无人车城市挑战赛中, 11 支车队进入了最终的决赛。冠军车队 BOSS 的控制策略分为道路导航和区域导航(Chris Urmson, et al. 2008), 在道路导航中, 为了提高控制鲁棒性并避免静态和动态的障碍物, 运动规划根据道路中心线生成一系列轨迹和局部目标, 其纵向距离是固定的, 但是横向距离不同。使用轨迹生成算法计算到达目标点轨迹的可行性。对于每一个目标, 生成两个轨迹: 一个光滑的轨迹和一个陡峭的轨迹。光滑的轨迹初始曲率参数固定为车辆状态前瞻性预测的曲率。陡峭的轨迹初始曲率参数设置为从车辆前瞻性预测到产生一个急剧初始行为的补偿值。轨迹上的速度分布需要根据诸多因素进行计算, 包括行为子系统给定的最大速度的约束、当前路段的车速限制、鉴于道路中心线曲率的最高可行速度和目标点的期望速度。其特点是, 考虑的情况非常充分, 从而使得系统的鲁棒性很强。

取得第三名的车队 Odin 采用了基于驾驶员行为的控制模型(Andrew Bacha, et al. 2008), 将驾驶行为分为: (1) 按预定路线行驶 (RNDF): 在没有交通车辆和其它障碍物的情况下; (2) 通过驾驶: 遇到障碍物或者慢车时, 选择合适的驾驶行为安全顺利的通过; (3) 封锁驾驶: 当障碍物或者车辆使得道路阻塞时, 驾驶行为将另选择适当的道路在十字路口的三种运动行为优先、并入、左转。他们设计的驾驶行为能够处理不断变化的, 有噪声的, 不完整数据和非瞬间的上层决策的控制。由于没有统一规划模块而且各个单元及行为的控制是共享的, 所以协调变得极为重要。因此, 系统使用了一种行为选择的仲裁方法, 解决可能出现的行为冲突, 这种方法包括一种改进 winner-takes-all 机制和一个分层有限状态机。运动控制系统规划一个独立于平台的命令系列, 包括所需的曲率、曲率变化、做大加速度、速度及每个命令的时间。其中速度是 PID 闭环控制, 转向控制依赖于一个标准的环路模型估计车辆的曲率响应。

另一车队 Talos 则是根据导航器输出的路径和低级控制器输出的速度命令。使用基于快速扩展随机树(RRT) (LaValle and Kuffner, 2001)的方法通过随机的无数样本点生成动态轨迹可行树。并对典型 RRT 进行了一些扩展 (Frazzoli, 2001)。

第一个扩展是从控制器的输入抽样和运行闭环仿真。另一种扩展 RRT 算法是利用环境的物理逻辑结构进行偏性 2D 采样并用于形成转向控制器的输入。它的控制器由两部分组成：一个纯跟踪式转向控制器和比例积分(PI)速度控制器。用一个纯跟踪式算法实施转向控制，长期以来，无论对于地面车辆还是飞机，它都显示了优良的追踪性能一个简单的 PI 控制器被用于跟踪预定的速度。这两个核心模块不仅嵌入了执行控制器，也在预测轨迹的运动规划器里。生成的控制信号被发送到驱动的 ADU 中，并且控制器回路以 25 赫兹运行(Park et al., 2007)。。

在车辆的控制方式上，郭孔辉(1991)院士提出了基于“预瞄—跟随”的控制模型。这个模型的基本特点是：驾驶员在驾驶车辆时，能够自动地跟随期望轨迹。王荣本，游峰，张荣辉(2001)等人对于视觉引导的智能车辆，以二自由度动力学模型和车辆预瞄运动学模型为标称模型，分别采用最优控制、模糊控制和滑模变结构控制的方法，结合视觉传感器，实现了跟随车道线的控制(张荣辉,2007; 王荣本,等, 2007)。游峰针对具体的超车任务，以车辆轨迹跟踪误差的收敛性为目标，采用基于 backstepping 方法，设计了针对超车任务的轨迹跟踪算法(游峰,2005)。任殿波，张继业等人同样针对超车任务，根据车辆期望运动状态计算了换道时的期望横摆角，横摆角速度和角加速度，采用了非奇异终端滑模控制方法，设计了滑模控制规律(任殿波,等, 2011)。高峰，李克强等学者考虑了车辆纵向运动模型不可确定的特点，采用了多模型分层切换控制的方法，该方法基于鲁棒控制理论，并且，进行了理论上的分析及仿真实验(Gao Feng, et al.,2006)。

在这一研究方向，基本目的是要提高车辆控制算法精确性、鲁棒性和对不同路况的自适应能力。首先需要从非线性系统稳定性分析的角度，研究车辆对轨迹跟踪误差的收敛性，这是车辆能够实现对轨迹跟踪的前提。其次，还需要研究鲁棒性强以及具备环境自适应能力的控制算法，以保证车辆工况大范围变化时的控制性能。最后，要扩展车辆运动控制的功能，能够使车辆完成泊车、超车、汇入车流等不同的任务。

我国相关技术研究开展得较晚，与西方国家存在很大差距。在面向汽车主动安全的智能驾驶技术方面，国防科技大学相对处于国内领先的地位，该校于 2003 年联合研制成功“红旗旗舰”自动驾驶系统。该系统采用 PI 横向控制和非线性 PID 纵向控制，在高速公路环境简单，道路情况变化小，干扰少的情况下容易获得很好的效果。但在复杂的城市环境中，常规的 PID 控制算法将会带来参数优化的困难，而使控制效果欠佳，无法自动环境适应变化。

我国在 2009 年和 2010 年也分别举办了“智能车未来挑战赛”。参赛队伍包括武汉大学、湖南大学、装甲兵工程学院、军事交通学院、中国科学院合肥物质科学研究院、清华大学、国防科学技术大学、西安交通大学、南京理工大学、北京

理工大学 10 支代表队。从比赛中可以很好地看出我们技术水平的缺陷。在横向控制方面,算法较为简单,考虑情况不够充分,导致鲁棒性较差,在有干扰时或高速行驶时会发生震荡;在纵向控制中,精度不够使得泊车定点控制和车速的准确控制成为难点。整体系统对于不同路况的适应性较差,因而在系统必须人为设定状况切换使得在不同道路下(如曲线和直线道路)分别使用不同的控制策略,从而设计自适应控制器。在自适应 PID 控制器中,通过根据系统状态、对象特性的变化而改变 PID 参数,以获得更好的控制效果。目前已提出的自适应 PID 控制方法主要有模型参考自适应控制(Byrne.R.H. 1995; Wei Wang,et al.,2006; Li,Z., et al.,2011),模糊自适应 PID 控制(Hessburg, T. 1994,; Choomuang R,et al.,2005),基于神经网络的自适应 PID 控制(Park PC,et al.,1989; Puntunan S.,et al.,2006)和基于进化算法的自适应 PID 控制器(Doi Masayoshi, et al., 2011.)等。另外,人类驾驶员行为的分析方法和建模方法也是我们需要学习研究的内容。

1.4 本文主要研究内容及研究意义

以“智能先锋”无人驾驶车辆平台为基础,介绍了平台的感知系统、决策系统、控制系统及执行机构。介绍了城市道路的环境特点,结合驾驶员的驾驶行为方式,提出了无人驾驶车辆在城市道路运动控制方面遇到的关键性问题和采用的研究策略。

研究车辆纵向动力学控制方法。研究车辆动力传动特性和制动力学特性,结合汽车动力学系统强非线性特点,在传统 PID 控制基础上结合专家控制系统的思想,提出了专家 PID 控制算法,控制车辆加速度。建立了刹车和油门的切换控制逻辑,使控制系统能够在两种控制输入条件下平滑的切换,并解决在传动系统高度非线性和复杂的纵向干扰条件下的控制精度的问题,实现无人驾驶车辆在道路行驶的速度控制。

研究基于车辆操纵动力学的横向控制方法。建立车辆操纵动力学模型,进行车辆操纵动力学和轮胎侧向力学分析,在“预瞄—跟随”理论的控制模型的基础上,针对城市道路环境复杂多样的情况,设计了一种小脑模型神经网络与 PID 复合的横向控制器,对不同的环境信息和不同驾驶模式分别进行系统参数优化,从而使无人驾驶车辆能够灵活的在各种道路环境中实现稳定准确的道路跟踪行驶并具有较强的鲁棒性。

研究车辆高速行驶时的运动学特性,联合考虑纵向控制和横向控制之间相互制约关系,重点研究车辆高速行驶时的安全性。

本文最后在“智能先锋”无人驾驶车辆平台上验证了上述研究内容的有效性

和可靠性，并根据实验结果总结了目前控制系统设计方法的优势和不足，对进一步的研究提出了展望。

第二章 城市环境下无人驾驶车辆控制系统的设计分析

本章首先介绍了城市环境的道路特点,结合驾驶员对车辆的控制方式,提出了无人驾驶车辆在城市道路运动控制方面遇到的关键性问题。然后,介绍了“智能先锋”无人驾驶车辆平台的体系结构及感知系统、决策系统、控制系统和执行机构各子系统的硬件组成及功能。最后阐述了本文所采用的控制系统研究策略。

2.1 城市环境中无人驾驶车辆所面临的问题

2.1.1 城市道路环境特点

我国城市道路的等级分类主要有快速公路、主干道、次干道和支路四种(文国玮,2005)。车辆行驶在不同等级的道路所要遵循的交通规则是不同的。对道路等级的准确认知,是驾车在道路中行驶的前提工作。在不同类型的道路中交通规则要求不同,行驶环境条件的不同,驾驶员的驾驶行为特征与注意力焦点也是不尽相同的。

快速路是车辆行驶时,速度可以达到较高范围的道路,是车辆专行道路。一般在快速路行驶的速度限制为 60-80 公里/小时。驾驶员在这种道路上行驶时,速度一定要快,一般没有交通信号灯,同时也没有非机动车或者一些道路基础设施干扰,驾驶员的视线较为清楚。驾驶员在没有外部干扰的情况,在快速路上应当快速地通过。

主干道的设计目的是以普通交通通行为主,车辆的行驶速度一般限制在 40-60 公里/小时。主干道的设计时速比快速路要低,因为它主要承担着连接快速路与低速路的责任。驾驶员行驶在主干道时,处于主要的地位,应在速度限制范围内快速地通过。行驶期间,多数十字路口会设置红绿灯,车辆应遵守交通信号指示。在主干道上行驶时,其有隔离措施,通行速度高低不均,有可能会遇到堵车现象。在路口时,由于一些车辆可能会需要变更车道,续而可能引起交通冲突,甚至造成一些安全事故。

次干道是一种具有服务功能的交通集散道路,它主要负责承接主干道与各生活工作区域的道路。车辆在次干道必须以低速行驶,其行驶速度一般限制在 40 公里/小时以内,在支路的行驶速度限制在 30 公里/小时以内。这两种道路的主要功能是使非机动车优先通行,多见于居民居住区内,并且道路中分离设施不完备,同时交通情况较为复杂,道路上行人来往密集,车辆与非机动车交错行驶。驾驶

员驾车行驶在道路上，应特别注意周边环境及各种突发情况。

交叉路口是城市道路的重要组成部分，它也是交通冲突、道路拥堵和交通事故的主要发生地。据交通部门统计，在城市道路发生的交通事故中，路口事故占60%以上。

从形态上分城市道路交叉路口有平面交叉路口和立体交叉路口两种，立体交叉路口可以有效的提高路口的通行能力，能够彻底解决道路交叉冲突，但由于立体交叉路口的设计和实施会受城市道路面积和建筑成本的限制，尚无广泛应用。平面交叉路口包括：三叉口、四叉口、多支路叉口和环型路口等。路口的交通冲突量的多少随路口的叉路数的增加为增加。若交叉路口的叉路数为五，其交通冲突的个数将高达52个。行驶通过平面交叉路口时，应当严格遵守交通信号灯的指示，并时刻注意各个方向的来往车辆及行人，以防因速度偏差等因素而增生的交通冲突(全永桑，1989)。

城市道路的特点一般是：道路分类多样，车流混杂，行人非机动车辆多，车辆类型多样，交通的组织较复杂，道路交叉多，交通冲突多易拥堵，交通流速缓慢通行能力较低。根据不同城市交通规划的不同，城市道路网的特点也有不同。

在我国，城市交通主要有以下几个特点：

- 1) 城市多为紧密型的分布，城区密集人口密度大，相对路网建设不完善，难以适应城市汽车数量的急剧上升，导致城市道路通行压力大。
- 2) 交通结构复杂，行人、非机动车辆、机动车和其他特殊车辆等各种交通流相互交错。
- 3) 市民交通意识差、交通参与人尤其车辆驾驶员违章现象时有发生。在各种交通车辆混行道路上行驶应保持警惕。

以上是我国城市道路交通的主要特点，也造成城市道路行驶的交通安全和交通管理方面的各种难题。除此之外，在错综复杂的城区道路中，车辆的安全通行还需要清晰合理的车道线形、隔离清晰的路沿路面、视野开阔的道路交口以及完整感觉的隧道。但实际驾驶时，总会有一些不尽如人意的道路条件，例如车道线中断、交叉口路边有障碍物遮挡视线等情况，这些也都对驾驶员在行驶过程中带来难题。

2.1.2 驾驶员在城市道路中行驶所要完成的任务

驾驶员操纵汽车的行为是对汽车的方向与速度进行调节以使汽车安全前进，包括驾驶员对道路交通环境的感知，对汽车可行区域的规划处理，对汽车预期轨迹的预测和决策以及对车辆方向盘、档位、油门、制动的操作及其控制校正等。

驾驶员在行驶过程中的主要任务包括：

- 1) 根据道路的标线规定,包括车道分界线、导向车道线、导向箭头、停止线、人行横道线等,驾驶车辆在正确的车道内行驶。
- 2) 根据道路的速度限制规定和车流人流通行的情况、路面状况和天气情况,合理控制行驶速度。
- 3) 根据车辆的车速、道路、地形等变化,合理控制行驶间距和行驶的横向距离。
- 4) 在会车、让车或超车过程中,驾驶员必须根据车辆的位置和速度照顾到前后及两侧的情况,提前打开转向灯,合理控制车速寻找并道机会。
- 5) 通过路口需要遵守交叉路口的标志牌及信号灯的指示,行近路口时需要提前减速,并以不超过 20km/h 的速度通过路口。同时要随时注意避让行人和其他有先行权的车辆。

2.1.3 结合驾驶员驾驶行为提出无人驾驶车辆所面临的问题

结合城市公路环境下车辆运动控制问题的特点,本文所研究的无人驾驶车辆控制系统主要面临以下问题:

- 1) 本文所讨论的城市道路环境具有明显的结构化道路特征,例如车道线,斑马线,红绿灯等外部环境信息。在这种特定的条件下,无人驾驶车辆的决策系统的规划与控制方法的选择都要受到环境的制约,这需要我们能够对这种结构化环境带来的约束进行定量的描述,从而能用数学语言来描述决策制定。
- 2) 无人驾驶车辆的最终设计目标是使得车辆能够像“驾驶员”一样驾驶车辆,到达目的地,这就需要在车辆决策与控制方法的设计上,最大程度的“拟人化”,例如,控制系统在控制车辆执行转向时,应该像经验丰富的驾驶员一样,平稳地控制转向。但是,现有的无人驾驶车辆研究理论并不能取得很好的结果。
- 3) 在城市道路环境中,不同等级的道路对车辆速度的限制不尽相同,这就需要无人驾驶车辆的纵向和横向控制器的控制结果准确、及时并具有自适应性和鲁棒性。

2.2 “智能先锋”无人车体系结构及功能

中科院合肥物质科学研究院自 2008 年起开展面向城市综合环境的无人驾驶车辆关键技术及平台的研究,并成功研制了具有环境感知、路径规划、行为决策、自主控制能力的智能车辆平台——“智能先锋”。并在国家基金委举办的 2010 及

2011 广汽丰田杯“智能车未来挑战赛”中分别获得第一名和第三名。

“智能先锋”无人驾驶汽车系统总体结构采用分布式结构，主要由环境感知系统、决策系统、传感器子系统、车辆控制系统、车辆执行机构组成，各个子系统之间除车辆操作接口子系统之外，全部采用以太网连接，以保证高速、可靠的数据传输。图 2.1 表示了无人车系统的硬件框图。

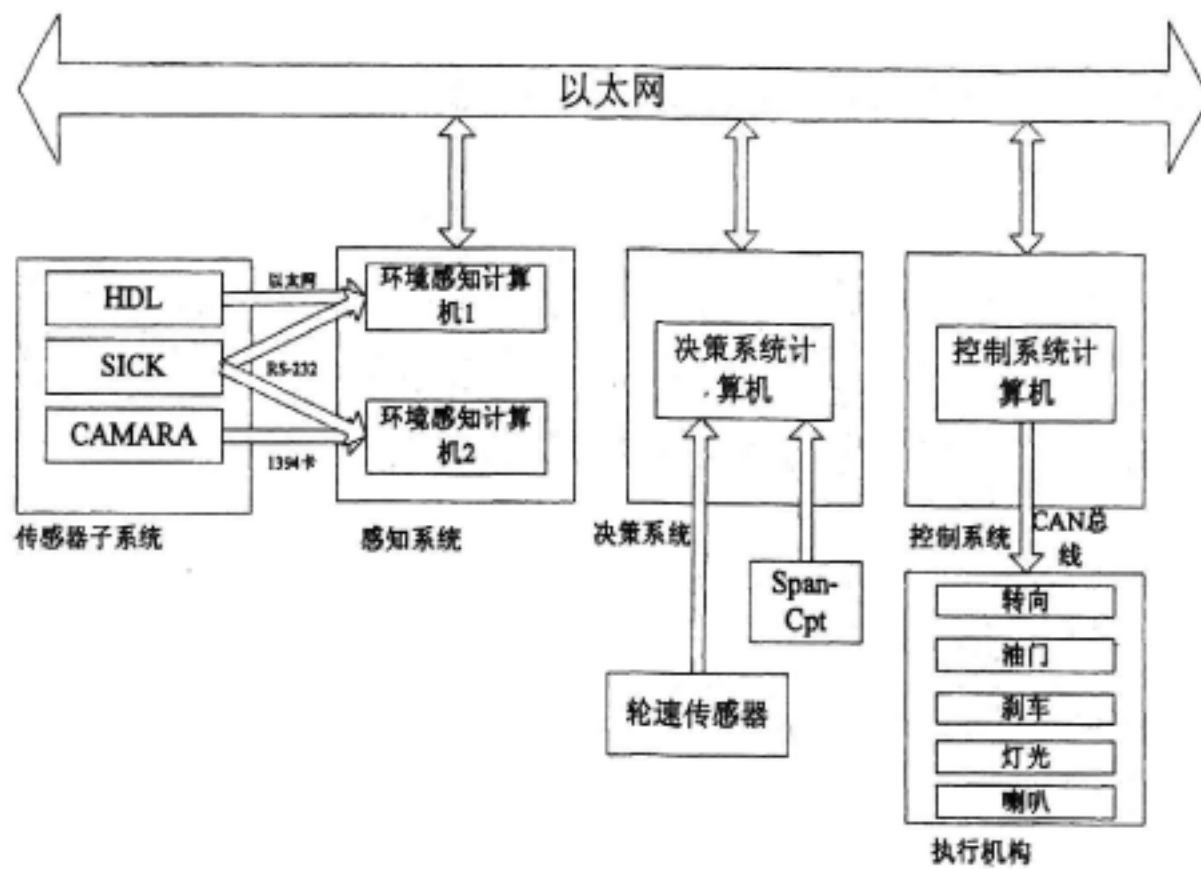


图 2.1 无人驾驶汽车系统框图

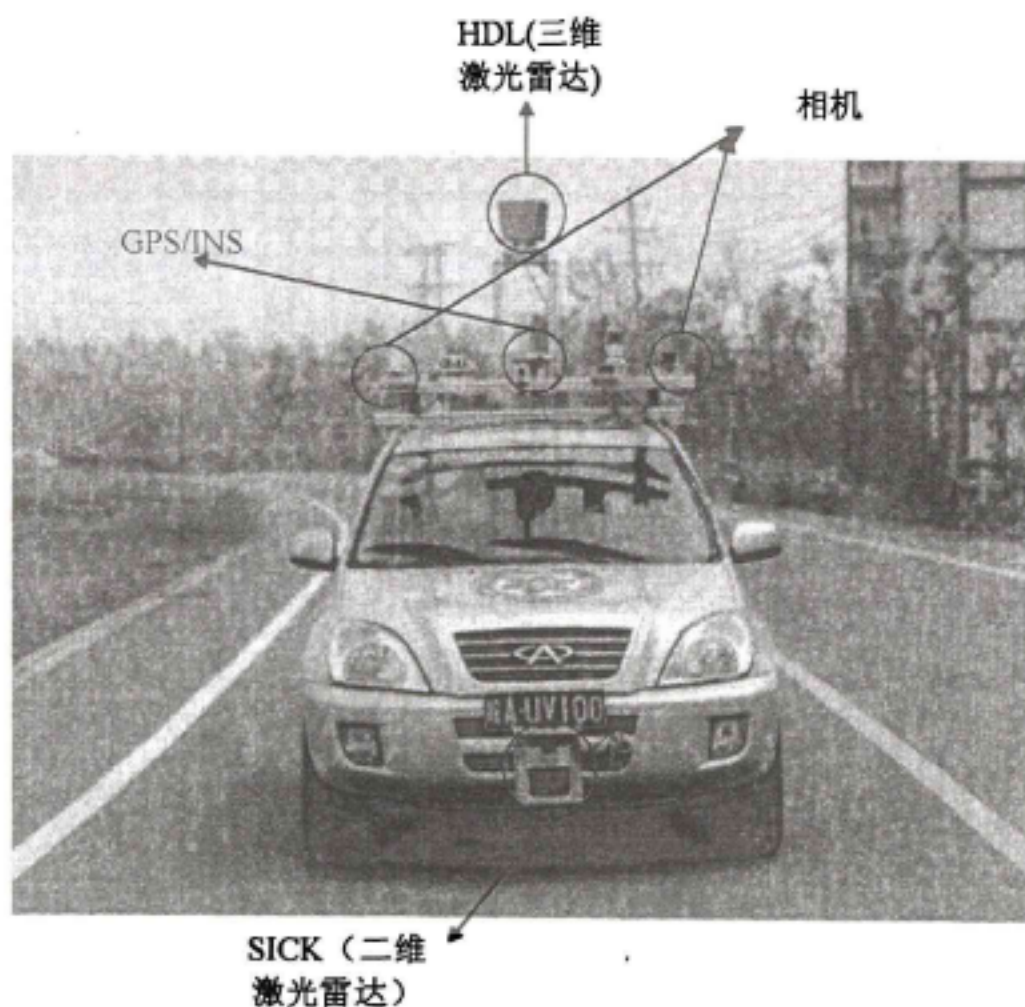


图 2.2 传感器安装示意图

感知系统：针对城市复杂交通环境，选用三维激光雷达进行城市复杂环境三维建模，使用二维激光雷达和相机信息的融合进行障碍物、车道和交通标识的快速检测和准确识别，使用毫米波雷达进行动态目标及其速度的检测。

使用 GPS/INS 组合导航系统、姿态航向参考系统（AHRS）和高精度里程计组成无人驾驶车辆定位模块，进行无人驾驶车辆的航迹推算和定位。传感器安装如图 2.2 所示。

配备了多台激光传感器，视觉相机，并且配备了两台计算机，用来接收，处理传感器所传递的原始数据。传感器配置如表 2.1 所示：

表 2.1 传感器配置表

传感器型号	数量	特性	用途
SPAN-CPT	1	定位精度：1cm 速度精度：0.02m/s RMS 位姿精度：0.05度(俯仰、横滚)， 0.1度（方位角） 刷新率：5Hz	惯性和 GPS 导航
Velodyne HDL-64E S2 LIDAR (HDL)	1	360×26-度范围（FOV）角度分辨率0.1度 70-m 最大量程	全向立体探测，近距离障碍物检测
SICK LMS 291-S05 LIDAR (LMS)	5	180 deg × 0.9 deg视野(FOV)， 角度分辨率1度 80-m 最大量程	全向，中距离探测，
Point Grey Firefly (PGF)	4	高动态范围相机 45-deg 视野(FOV)	前后视，远距离探测
Delphi ESR 毫米波雷达	2	测程：174m，FOV：+/-10度， 更新率：50ms	远距离障碍物探测及速度检测
AHRS M2-M	1	位姿精度：0.4度(俯仰、横滚)， 0.7度（方位角） 刷新率：1-100Hz	测量车辆姿态，惯性导航
轮速传感器	2	传感器输出一周1000脉冲，AB相4倍频采集，测量理论分辨率0.5mm，在高低速工况下，数据准确可靠	精确测量车辆行驶距离

决策系统：通过周边环境识别的结果，通过 span-cpt 的定位信息及轮速传感器的辅助对当前所处环境进行任务上地划分判断，实时地规划出路径并且跟踪路径，计算出的控制目标通过以太网发送给控制系统，最终，通过 can 网络发送至相应电机执行动作。

智能决策是无人车研究的一个核心问题。它是无人车的大脑，其目标是在存在障碍物的复杂交通环境中，为无人车寻找一条满足车辆控制约束、无碰撞、甚至符合交通规范的路径。

总体结构框图如图 2.2 所示：

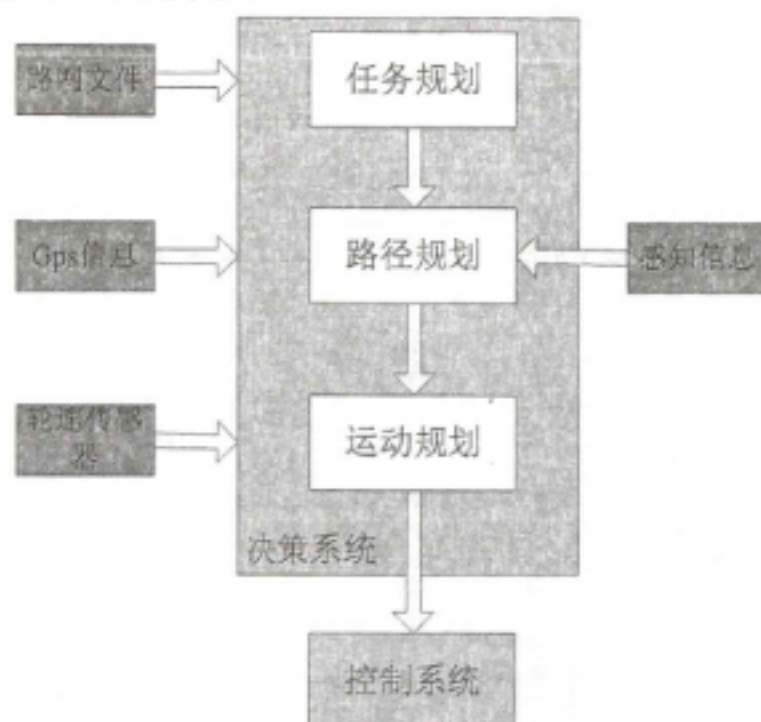


图 2.2 决策系统结构框图

控制系统：采用 CAN2.0B 总线构建车辆控制系统网络，通过 CAN 网关和车身 CAN 网络通讯，建立基于 CAN 总线的无人驾驶车辆分布式自动控制系统，各控制对象和状态检测单元通过 CAN 总线接入控制系统，控制系统计算机可以通过车身 CAN 总线直接获取车辆的状态信息，并通过 CAN 总线将控制指令发往各控制对象，实现对车辆转向、制动、油门、档位，以及灯光和喇叭的控制。

车辆执行机构：“智能先锋”是以奇瑞瑞虎 3 为基础研制的，瑞虎 3 紧凑简洁的独立悬架系统使整车具有良好的行驶稳定性和通过性，全部由奇瑞公司自主研发的车载网络系统，使车辆具有很好的可扩展性，各种传感器、执行器可以做成 CAN 节点形式，方便地接入网络，实现系统集成。车辆控制系统包括转向控制、制动控制、油门控制、档位控制、灯光和喇叭控制等。

车辆控制系统的设计原则：

- 1) 安全原则：所有附加机构不影响原车辆的控制性能，保证车辆操控安全；
车载电源不高于 24V，保证用电安全；
- 2) 便利原则：能够方便地实现手自动切换。

转向控制：对原转向柱进行改造，通过大功率伺服电机实现快速准确的转向

控制，如图 2.3 所示。

制动控制：通过附加的踏板机构，制动控制采用齿轮齿条配合控制制动踏板实现，如图 2.4 所示。

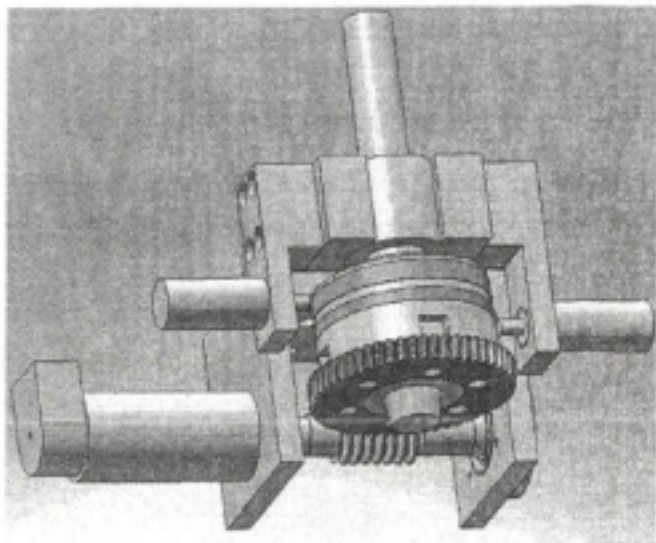


图 2.3 转向机构

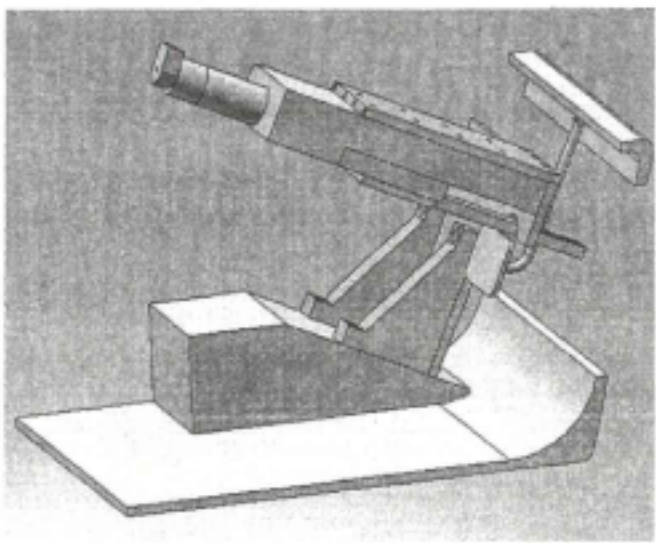


图 2.4 制动机构

油门控制：通过电子油门直接控制发动机电子节气门的开度实现控制车速，如图 2.5 所示。

档位控制：采用精密电控位移台，如图 2.6 所示。

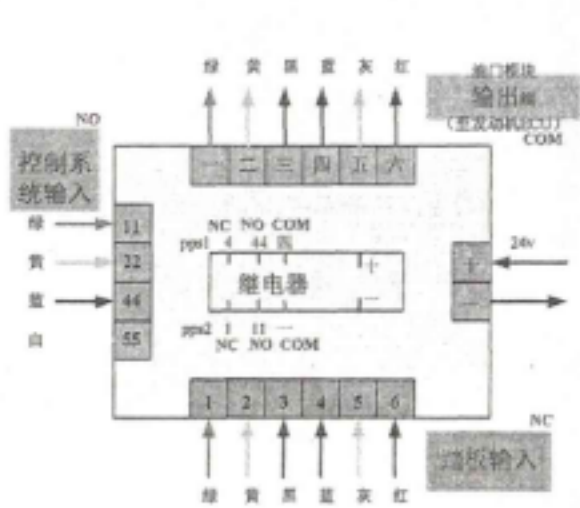


图 2.5 油门控制

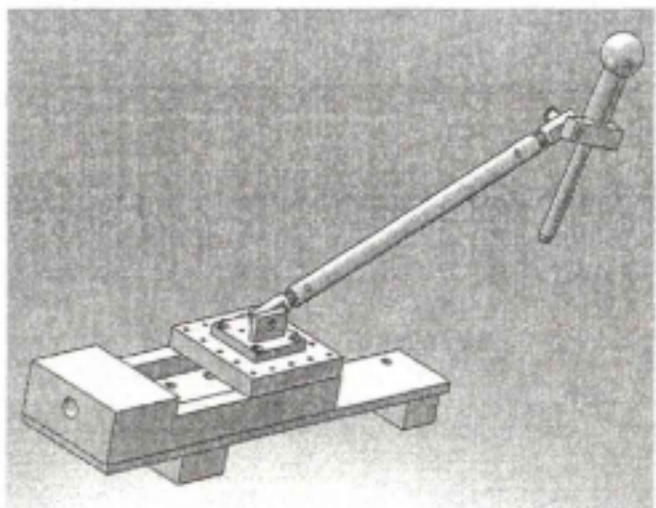


图 2.6 换档机构

喇叭和各种灯光的控制均采用直接控制车身电路的方式实现。

电源系统采用分模块供电方式，各模块设置独立的电源开关和保护装置，如图 2.7 所示。

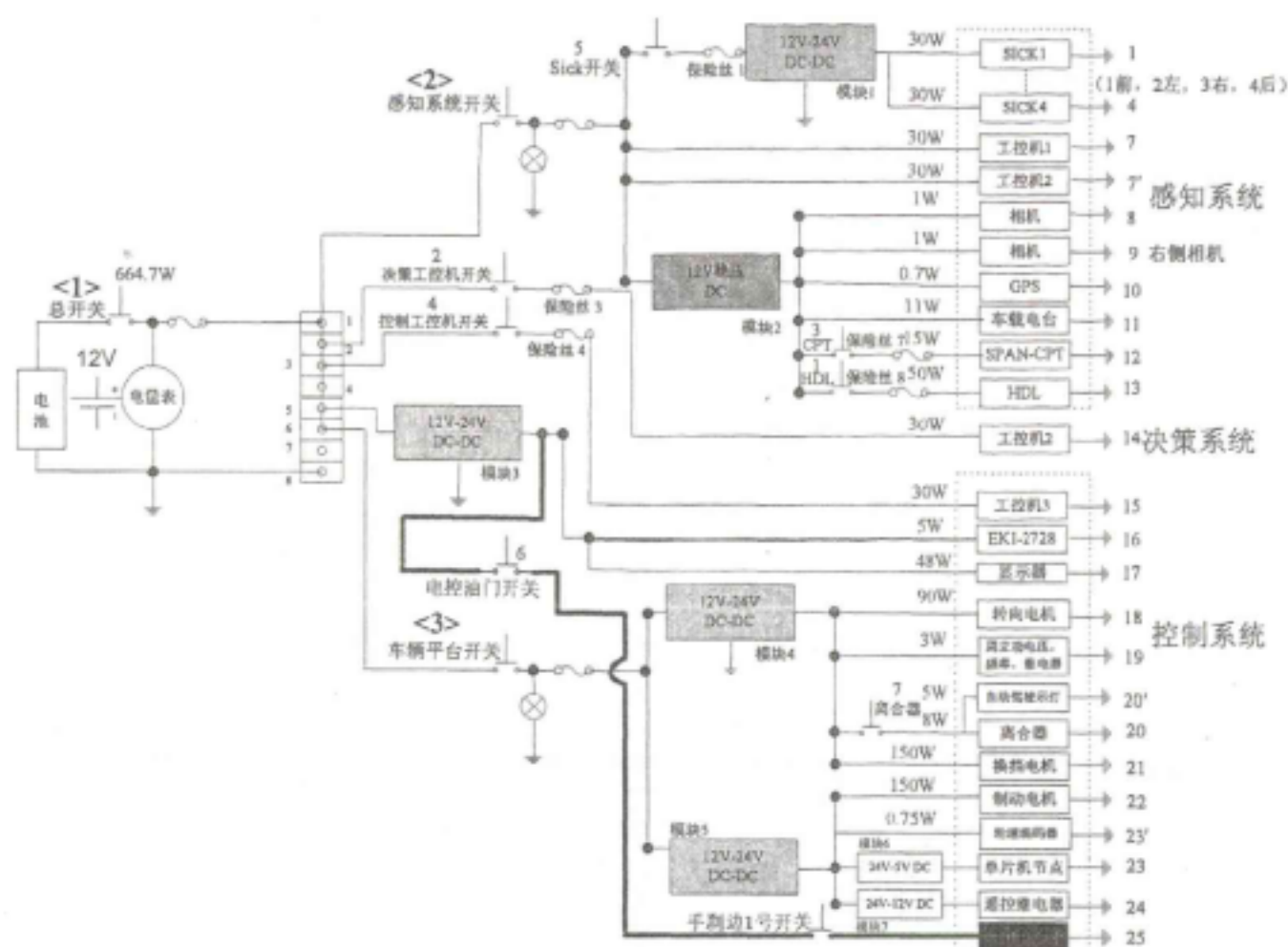


图 2.7 车辆平台电源系统

2.3 控制系统设计方法和设计指标

控制系统的功能是将来自决策系统产生的路径规划轨迹转化为各执行机构动作，并控制各执行机构完成相应动作，实现对路径及速度的准确平稳的跟踪。它是整个无人驾驶车辆系统的最底层，由一系列传统控制律和逻辑推理算法组成，其中包括车速控制、方向盘控制、刹车控制、档位控制、灯光、喇叭控制器等组成。为了确定执行路径跟踪的控制律相关的参数，我们首先需要规定车辆期望行驶轨迹和状态的表达方式。根据给定的期望轨迹，控制系统将采用预瞄—跟随控制策略，即指定给定轨迹中的一点，通过计算该点和车辆的相对位置，并根据车辆当前速度，确定方向盘转角信号，使车辆向该点移动。通过轨迹的更新，预瞄点的变换，重复这一过程，实现车辆对横向运动的控制。根据给定的期望速度，控制系统将选择相应的控制律并在一定的安全约束下控制其加速度，并建立相应的刹车和油门的切换控制规则，实现车辆对速度的平稳跟踪。

2.3.1 行驶路径的表述

从整车系统来看，上文提到“智能先锋”的系统结构分为感知系统，决策系统和控制系统，其软件结构如图 2.8 所示。系统从环境获得的感知信息主要包括：

- 1) 全局道路信息：比赛规则组在赛前提供路网定义文件(RNDF)，我们根据

RNDF 确定全局道路和交叉口的几何信息, 产生全局路径地图。

- 2) 局部道路信息: 感知系统通过摄像机、二维激光、三维激光采集数据, 产生一副 512×512 的二维栅格地图, 该地图能够描述车辆周围 $50 \times 50\text{m}$ 的可通行道路, 车道线, 障碍物分布情况; 此外还有通过摄像机采集到的道路交通标志信息。
- 3) 车辆定位信息: 无人车可以采用 GPS 定位, 同时车辆配备了轮速传感器和航姿基准系统(AHRS), 用来在保障失去 GPS 或不依赖 GPS 时确定车辆的位置姿态和速度信息。

其中, 决策系统的路径规划模块负责产生由车辆初始点到目标点的预测轨迹, 并根据环境信息的改变来更新车辆的轨迹, 这些轨迹经过相应的平滑处理后可以满足车辆的动态可行性。我们将该轨迹表示为一系列离散点 x 的集合, 参数点 x 表示车辆的行驶状态

$$\mathbf{x} = [x \ y \ \theta]^T \quad (2.1)$$

其中 (x,y) 为车辆位置, θ 为车辆的航向角。根据感知信息范围, 该轨迹长度最长为 50m 。除了生成路径外, 决策系统还生成其他的指令如行驶速度, 行驶状态(直行、转弯、停车等), 这些指令将以 10Hz 的频率发送至控制系统。根据这种轨迹生成的方式, 控制系统可以产生相应一系列的控制参数以满足上述状态 \mathbf{x} 。图 2.8 描述了常见的城市环境道路及其通过决策系统规划出的路径结果。

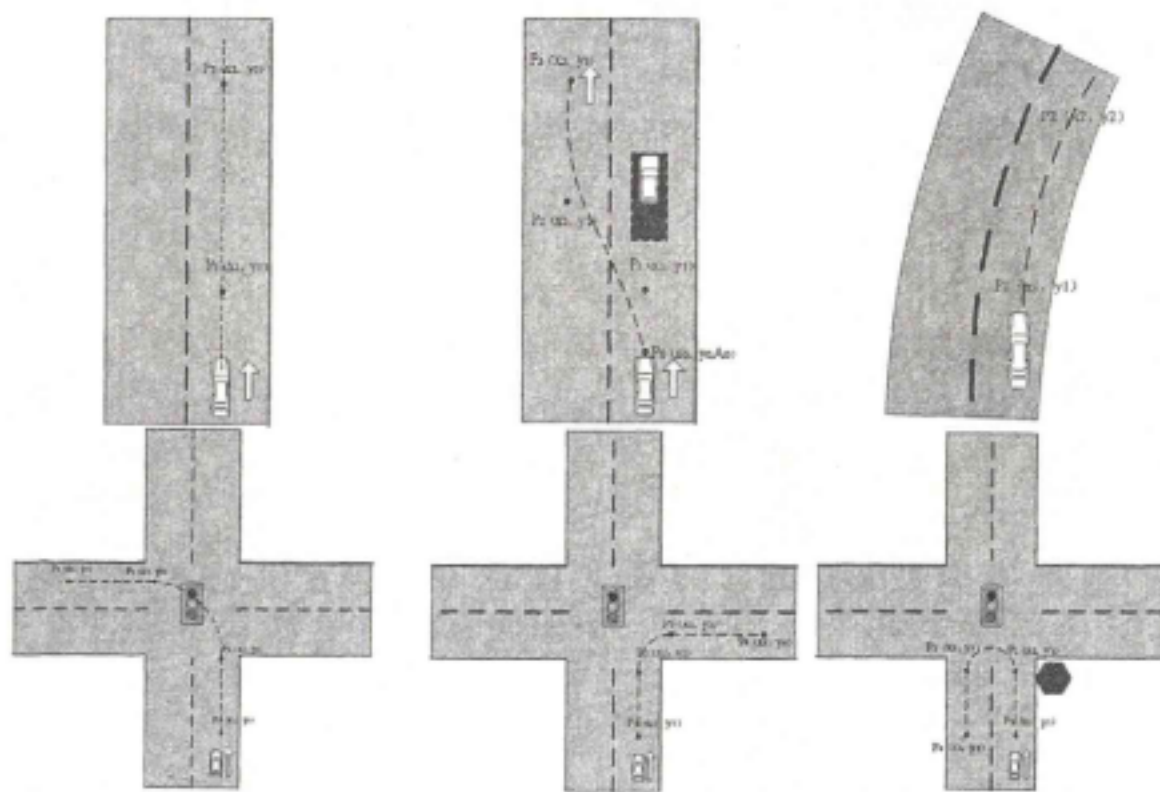


图 2.8 城市环境基本路况路径规划示意图

本文将无人驾驶车辆的运动控制分解为横向控制和纵向控制。横向控制是对车辆方向盘的转角的控制, 从而使车能够沿着期望的路径行驶, 而纵向控制控制

使对刹车、油门以及档位的位置的控制，目的是让车能够按照期望的速度行驶。

2.3.2 纵向控制

无人驾驶车辆的纵向控制主要研究如何控制车辆纵向运动，即控制车辆按照期望的速度行驶，控制车辆间距离，控制车辆的纵向加速度，控制节气门的开度和制动器的制动量以及两者之间的切换。图 2.10 是关于车辆的纵向控制。如今定速巡航控制系统已经作为大多数车辆的标准配置，利用该系统，驾驶员可以为车辆设置希望的恒定行驶速度，定速巡航控制系统通过控制节气门能够使车辆自动保持所设定的速度行驶。标准的巡航控制系统的设计一般为分层控制结构 (Liang, C.Y., et al., 1999; Guvenc, B. A. et al., 2006), 如图 2.11，上层控制器决定车辆的加速度期望值，下层控制器决定达到期望加速度值所需要的节气门输入量，并使用车辆动力学模型、发动机 MAP 图、非线性控制综合技术来计算跟踪设定加速度值所需的实时节气门输入量。在日常的驾驶中，定速巡航控制一般用于高速公路，而在城市道路环境下，由于其外部环境变化复杂，突发情况较多，需要频繁改变车速限制了定速巡航控制的使用，驾驶员需要根据环境的变化来控制车速。

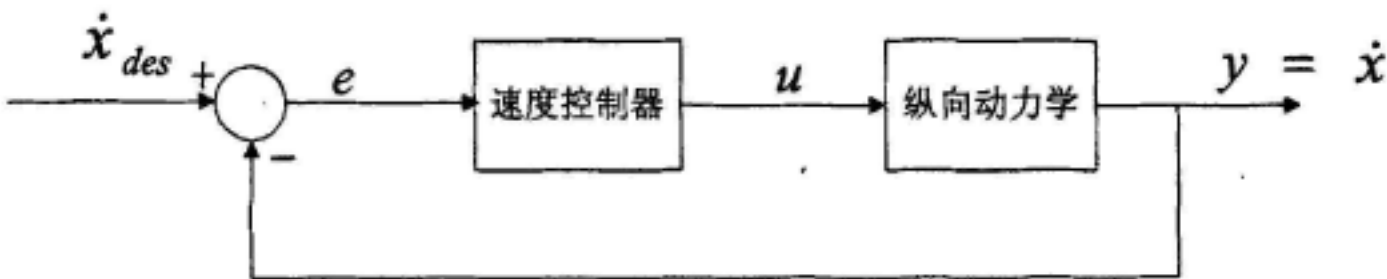


图 2.10 闭环速度控制框图

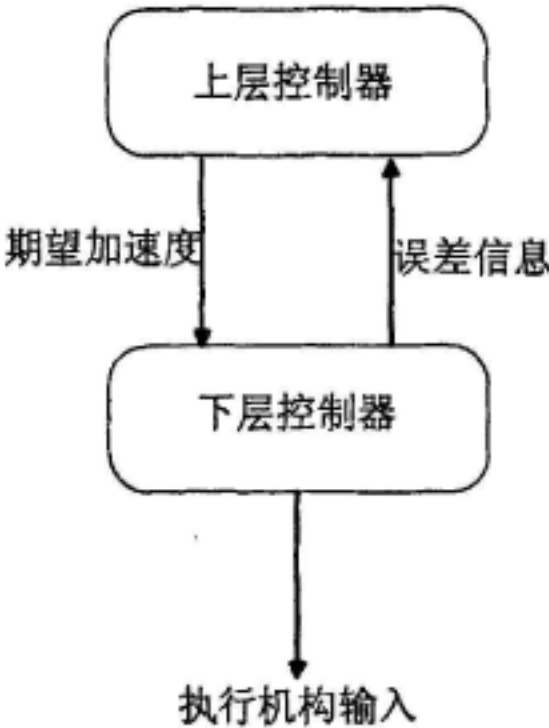


图 2.11 巡航控制结构示意图

对于城市道路环境中的无人驾驶车辆控制系统,纵向控制的设计目的是要使车辆具有以下性能:

- 1) 准确性:建立车辆纵向动力学,计算达到期望加速度值所需要的节气门或制动器的输入量,保证速度控制的稳态误差为零,并且有较快的响应时间。
- 2) 平稳性:加速度太大或变化不平滑,使车身产生颤振或冲击,控制系统应当使得加速度的变化更加平顺,不能过大,造成车辆突然加速,使乘客产生不适感,力求加速度变化产生的影响最小。
- 3) 适应性:城市环境中,常常需要频繁改变车速,同时车辆的纵向动力特性受外部输入条件影响较大,如路面附着系统、道路的起伏及天气条件等。因此纵向控制系统必须有较强的鲁棒性和适应性。

结合上述无人驾驶车辆控制系统的性能要求,具体提出以下指标。

- 1) 采用速度误差的平均值,反映速度控制的准确性,车速表的最小分辨率为 5km/h,驾驶员对车速控制精度不超过最小分辨率,因此制定速度误差的平均值小于 5km/h。
- 2) 采用速度控制的均方根误差,反映速度控制的稳定性。瑞虎车定速巡航功能的速度均方根误差在 0.54km/h,以这一指标为参考。制定速度控制的均方根误差为 0.5km/h。
- 3) 采用加速过程的平均加速度和制动过程平均减速度,反映速度控制的快速性。这两个性能指标的主观性比较强,在车辆正常行驶时,不同的驾驶员会采用不同的加速度完成车辆的加减速过程。而不同加速度选择对完成路径跟随任务影响不大。目前控制系统可以保证在起步后 30s 内,将速度增加到 60km/h;正常的行驶过程的减速,加速度约在 -1.5m/s^2 。

根据以上所述的设计要求和指标,本文首先建立车辆纵向动力学和运动学模型,进行车辆轮胎纵向力和传动动力学分析,然后,在传统 PID 控制算法的基础上,结合专家控制系统的思想设计专家 PID 控制方法控制车辆速度,建立速度控制 PID 系统的调参规则,从而解决车辆传动系统高度非线性和复杂的纵向干扰条件所带来的控制精度问题。

2.3.3 横向控制

无人驾驶车辆的横向控制主要研究如何控制车辆沿上层决策系统所规划的道路准确无误的行驶,同时要保证车辆的行驶的平稳性和安全性,并尽量满足舒适性的要求。图 2.9 描述了驾驶员对汽车的操纵过程,在日常的驾驶行为中,熟

练的驾驶员一般以开环模式驾驶汽车,这完全依赖于驾驶员对车辆响应特点的熟悉程度,知道怎样的输入能够产生期望的输出,这样车辆就可以在无需校正的情况下沿期望的路径行驶。而操作不太熟练的驾驶员则恰恰相反,当行驶在比较困难的路段时,司机需要密切注视周围的环境情况,并把这种信号视为反馈,实时地修正方向盘转角,实际上就是改变了控制系统的输入信号,系统此时为闭环方式。

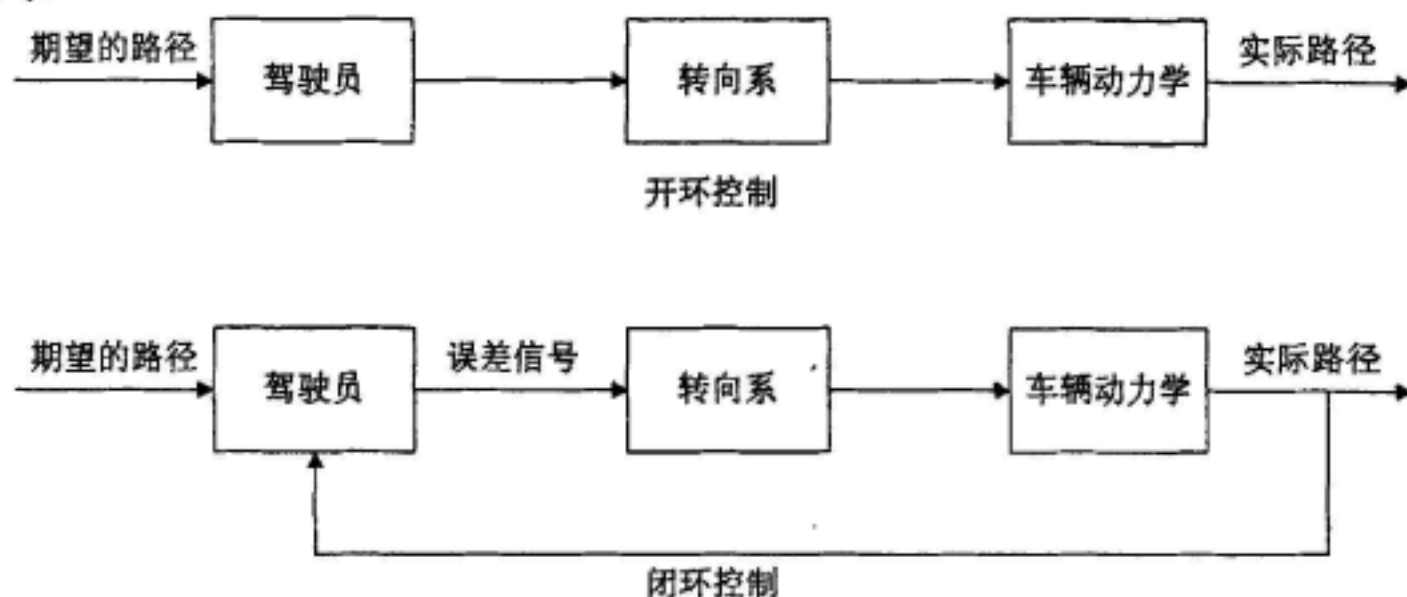


图 2.9 人类对车辆方向控制方式示意图

作为代替人类驾驶员操作的无人驾驶车辆控制系统,横向控制的设计目的是要使车辆具有以下特点:

- 1) 准确性: 建立车辆动力学和运动学模型,能够较为准确的预测车辆方向盘的输入产生输出特性,并根据输出反馈使车辆能够沿期望的路径行驶。
- 2) 平稳性: 车辆必须具备一定的抗干扰能力,有干扰输入时,车辆回到稳定状态应当快速,并保持一定的阻尼。
- 3) 适应性: 车辆行驶在城市环境时,外部输入条件变化范围广泛,如路面条件、道路限制条件及天气条件等。控制系统应该具有一定的自适应能力,使车辆在这些外部条件变化时能够保持一致的行为模式,保障准确平稳的行驶。

车辆的转向运动有两个自由度,横向运动和横摆运动,一般采用横向偏差和航向角偏差评价车辆对路径跟随性能的准确性。横摆角速度,反映了车辆横摆运动的速度,因此采用这一指标评价车辆的行驶稳定性。在设计控制系统之前,对于横向控制的准确性和稳定性,提出了以下指标:

- 1) 参考驾驶员一般城市道路沿规定车道行驶的要求,并结合本实验车辆奇瑞瑞虎车的几何特性,1.5m 轮距,因此制定横向偏差小于 80cm。对于

3.5m 宽的车道，这一指标可以保证车辆在行驶过程中不超出两侧车道线。

- 2) 对于车辆的航向角偏差，城市道路最高时速限制一般为 80km/h，因此考虑极端情况，假设车辆时速为 80km/h，车辆行驶方向与道路方向存在偏差角，车辆行驶 0.5s 后，若要求横向偏差不超出预定指标，航向偏差角必须小于 4.13° 。
- 3) 人类以 80km/h 速度在直线形公路行驶时，横摆角速度的峰—峰值（相邻波峰、波谷的差值）小于 $4^\circ/\text{s}$ 。参考这一指标，要求车辆高速直线行驶时，横摆角速度的峰-峰值低于 $4^\circ/\text{s}$ 。

根据以上所述的设计要求和指标，本文首先建立车辆横向动力学和运动学模型，进行车辆操纵动力学和轮胎侧向力学分析，并根据人类驾驶员的开环驾驶模式设计采用“预瞄—跟随”理论的控制模型设计车辆横向开环控制器，然后在传统 PID 控制器的基础上设计基于小脑模型神经网络与 PID 复合的闭环控制系统。

2.4 本章小结

城市环境的道路特点是功能多样，组成复杂，车速差异大，交叉路口多，因此无人驾驶车辆在城市环境中行驶所面临的任务较为复杂多样。本章结合驾驶员对车辆的控制方式，提出了无人驾驶车辆在城市道路运动控制方法的设计目标：应该最大程度的“拟人化”，能够像经验丰富的驾驶员一样平稳地控制转向和车速。本章第二节介绍了“智能先锋”无人驾驶车辆平台的体系结构及感知系统、决策系统、控制系统和执行机构各子系统的硬件组成及功能。最后按照车辆行驶的特点将“智能先锋”的控制系统分为横向控制和纵向控制，并根据实际驾驶员的驾驶行为提出了横向控制和纵向控制的设计指标，并根据指标提出了控制系统设计策略。

第三章 车辆纵向动力学及纵向控制方法

本章主要研究车辆纵向动力学控制方法。首先介绍车辆理想的动力传动特性和制动力学特性，然后结合汽车动力学系统强非线性的特征，提出了专家 PID 控制算法，根据实际驾驶员的驾车经验建立专家规则，解决在传动系统高度非线性和复杂的纵向干扰条件下的控制精度的问题，提高速度控制的鲁棒性，实现无人驾驶车辆在城市道路行驶的速度控制。

3.1 车辆纵向动力学分析

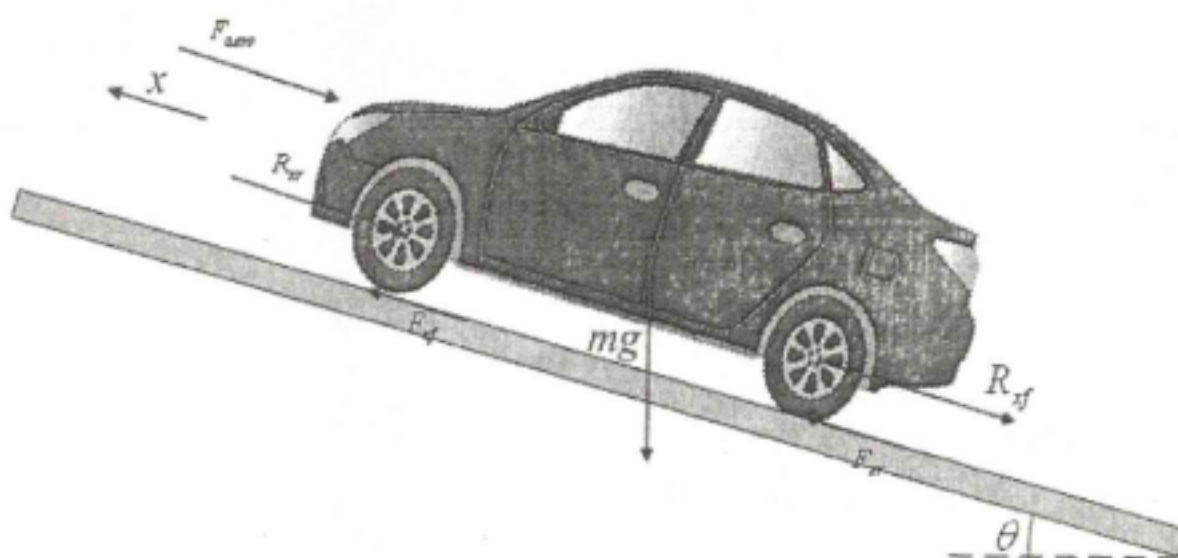


图 3.1 路面上车辆纵向受力分析

汽车是通过轮胎与路面之间的作用力和反作用力将发动机输出的动力转换为对车辆的牵引力而行驶的。考虑车辆在如图 3.1 所示的路面上的运动，影响车辆的外部纵向力包括空气阻力、重力、轮胎纵向力和滚动阻力。

沿车辆纵向 x 轴方向力的平衡方程式为：

$$m\ddot{x} = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg\sin(\theta) \quad (3.1)$$

式中， F_{xf} 、 F_{xr} 分别为前后轮胎纵向力； F_{aero} 为纵向空气阻力； R_{xf} 、 R_{xr} 分别为前后轮滚动阻力； m 为车辆质量； g 为重力加速度； θ 为车辆行驶路面的坡度。如果车辆纵向运动方向 x 指向左边，则 θ 定义为顺时针方向；如果纵向运动方向 x 指向右边，则 θ 定义为逆时针方向。

1) 轮胎纵向力

轮胎纵向力 F_{xf} 和 F_{xr} 是地面作用于轮胎上的摩擦力。其大小主要取决于三方面因素：滑动率、法向载荷、地面摩擦系数(Canudas-de-Wit,C. et al.,2003)。

若车辆纵向速度为 V_x ，旋转速度为 $r_{eff}\omega_w$ ，两者之间的差值称为纵向滑动(Pacejka, H.B.,1996)。则纵向滑动率定义为：

$$\text{制动时: } \sigma_x = \frac{r_{eff}\omega_w - V_x}{V_x} \quad (3.2)$$

$$\text{加速时: } \sigma_x = \frac{r_{eff}\omega_w - V_x}{r_{eff}\omega_w} \quad (3.3)$$

假设轮胎接触印迹的摩擦系数为 1，法向载荷是常数，轮胎滑移率和轮胎纵向力函数关系曲线如图所示。

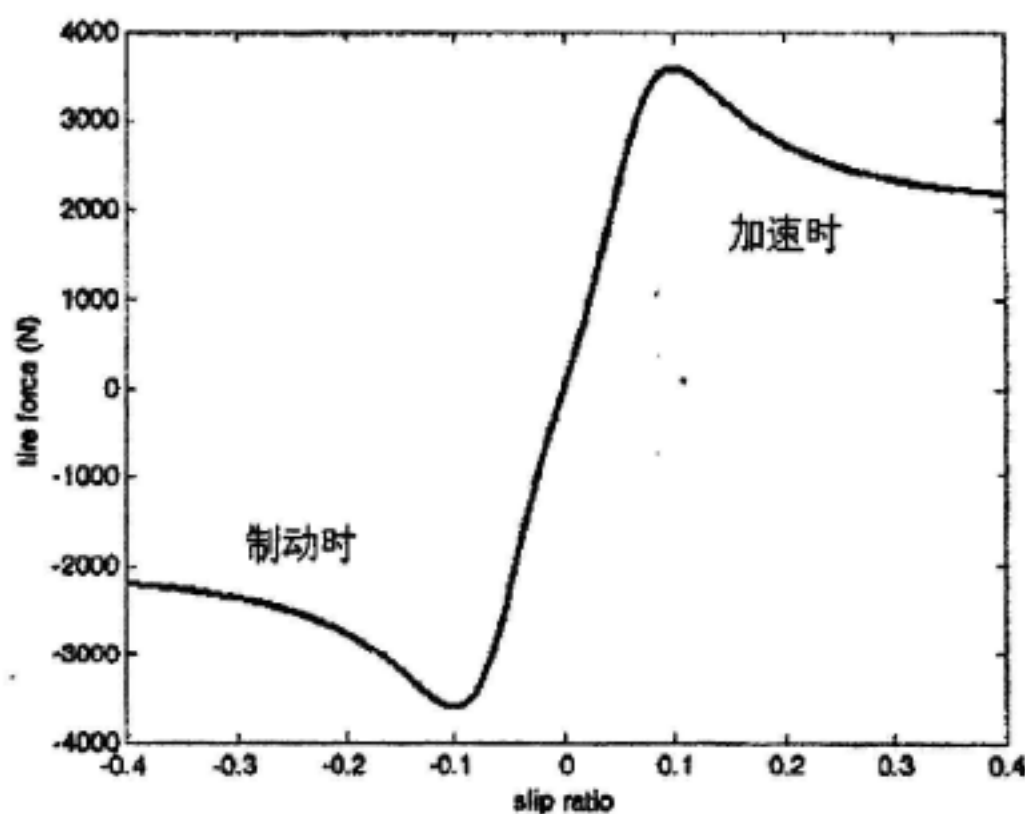


图 3.2 车辆轮胎纵向滑移率和轮胎纵向力关系曲线（引自 Rajesh Rajamani(2006)）

由于一般情况干净路面的滑动率小于 0.1，在纵向滑动率很小，而且正常驾驶的情况下，轮胎纵向力和滑动率成比例：

$$F_{xf} = C_{\sigma f} \sigma_{xf} \quad (3.4)$$

$$F_{xr} = C_{\sigma r} \sigma_{xr} \quad (3.5)$$

式中， $C_{\sigma f}$ 、 $C_{\sigma r}$ 分别为前后纵向轮胎刚度。

2) 空气阻力

作用在车辆上的空气阻力可以表述为：

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A_F (V_x + V_{wind})^2 \quad (3.6)$$

式中, ρ 为空气密度, 一般标准条件 15°C , 101.32kPa 大气压力时空气密度为 1.225kg/m^3 ; C_d 为空气阻力系数, 可以大致通过滑行测试获得。 A_f 为迎风面积, 即在运动方向上车辆的投影面积。 V_x 为车辆纵向行驶速度; V_{wind} 为风速。

3) 轮胎滚动阻力

由于轮胎的旋转, 轮胎和地面都在接触区域产生形变, 路面的刚度很大其形变可以忽略不计, 但轮胎是有弹性的, 由于法向载荷的作用, 当其进入接触面时会沿着法向变形, 消耗在轮胎变形上的能量就表现为阻碍车辆前进的滚动阻力, 如图 3.3 所示:

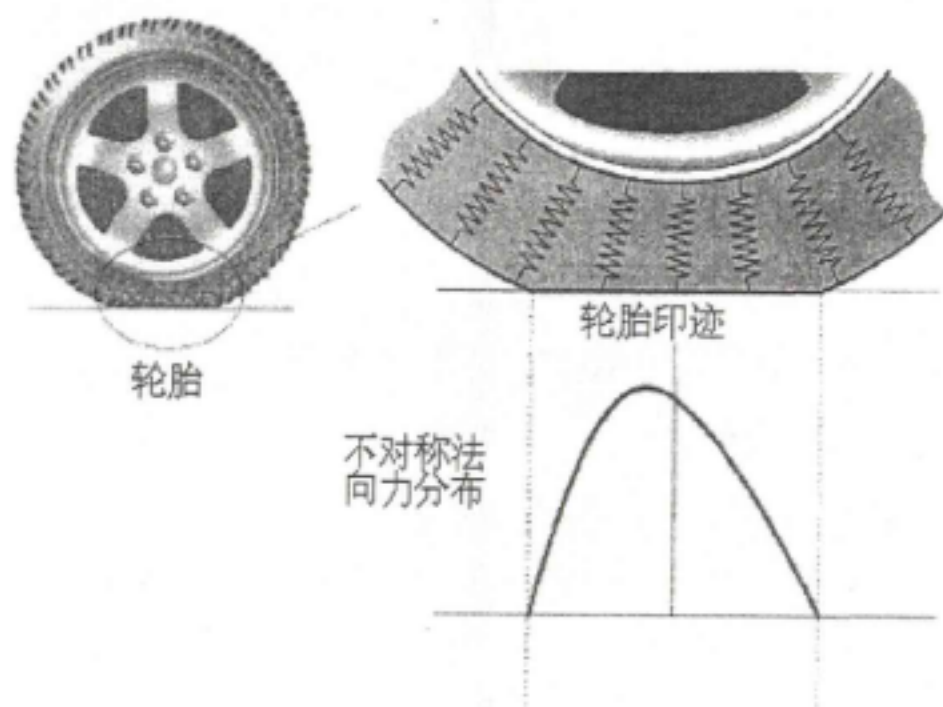


图 3.3 轮胎印迹的不对称法向力分布 (引自 Rajesh Rajamani(2006))

通常情况下, 滚动阻力模型的建立采用大致正比于轮胎上的法向载荷的模型。

$$R_{xf} + R_{xr} = f(F_{xf} + F_{xr}) \quad (3.7)$$

式中, f 为滚动阻力系数, 其变化范围通常是 $0.01 \sim 0.04$ 。 F_{xf} 、 F_{xr} 为前后轮的法向载荷, 根据车辆在地面的受力分析有:

$$F_{xf} = \frac{-F_{aero} h_{aero} - m\ddot{x}h - mgh \sin(\theta) + mgl_r \cos(\theta)}{l_f + l_r} \quad (3.8)$$

$$F_{xr} = \frac{F_{aero} h_{aero} + m\ddot{x}h + mgh \sin(\theta) + mgl_r \cos(\theta)}{l_f + l_r} \quad (3.9)$$

3.2 无人驾驶车辆纵向控制设计思想

通过上文对整车动力学的分析可知,在车辆的纵向速度控制中,控制对象所处环境的不确定因素干扰较大,对象模型实时变化,呈高度非线性,建立较为准确的控制对象模型很困难。而在实际驾驶员对车辆的速度控制中,并不需要了解车辆的准确模型,只要先有一定的驾车经验,简单了解车辆的动态特性,就能把速度调整在期望的设定值上。因此本文将在驾驶员速度控制行为模型的基础上研究无人驾驶车辆纵向控制器的设计方法。

3.2.1 速度控制驾驶员模型

车速的升高或者降低是驾驶员踩踏油门踏板或制动踏板作用的结果,不同的节气门开度和制动器位置可以使车辆的产生纵向加速度,从而改变车辆的行驶速度。由于车辆的发动机动力和制动摩擦力呈现出非线性的特性,因而车辆的纵向控制对象是一个参数变化的非线性系统。驾驶员对车辆的控制行为包括对环境的认知理想、对目标的识别判断、对行驶方向速度的选择,以及通过肢体的配合对车辆所需要的方向、油门、制动、换挡等机构的操作控制。其中驾驶员对速度的控制受到很多环境因素影响,包括车辆当时速度、车辆的目标速度、路面的湿滑度、路面的高低起伏和其他周围环境的特征等,驾驶员对这些因素的变换具有很强的应变能力,其控制的方式也具有自适应性、模糊性和时变性。

在实际的驾车行为中,驾驶员不太可能非常确切地了解车辆的纵向运动特性。有一定驾车经验的驾驶员也不必非常了解车辆的内部动力学特性,实际驾驶员通过分析车辆的速度及速度的变化率,在对油门和制动踏板的响应特性大致熟悉后,就能够根据车辆的速度误差来对车辆的速度进行较为准确的控制。

本文将模仿人类的思维来求解汽车速度控制这一大惯性、时变性和强非线性系统的控制问题,采用基于规则的专家控制器,根据人类对车辆驾驶的速度控制机理建立知识库,根据实验经验测量车辆速度给定值,速度偏差值,速度偏差变化的过程信息,并由知识库中的规则推导出控制量,实现对车辆行驶时纵向速度的实时控制。

3.2.2 “智能先锋”纵向运动特性分析

(1) 加速性能

“智能先锋”以奇瑞瑞虎为平台,其发动机采用电子油门。当驾驶员需要提升车辆速度时,改变油门踏板开度,其位置传感器产生相应的电压信号,作用于节气门控制单元,同时,车辆中枢控制单元提供给节气门控制单元车辆当前状态

如车速、节气门开度，并且计算车辆参数是否满足控制函数，对节气门开度进行补偿，获得节气门的最佳开度，最后，发送电压信号至电机驱动模块，从而控制车辆速度。“智能先锋”通过直接控制油门电压，实现速度的自动控制，电压信号输入范围为 0.37~1.6V，实验时取电压值 0.5~1.4V。对应不同的油门电压值，车辆速度(m/s)随油门电压响应曲线如图 3.4 所示，其采样时间为 50ms，可见在给定的油门开度的情况下速度呈非线性变化。图 3.5 显示了车辆加速度(m/s²)随油门电压响应曲线变化的情况，由图可见在给定的油门开度的情况下加速度是随速度的增大而减小的，并且受外界环境干扰较大，因此难以对其动态特性建立精确的仿真模型。

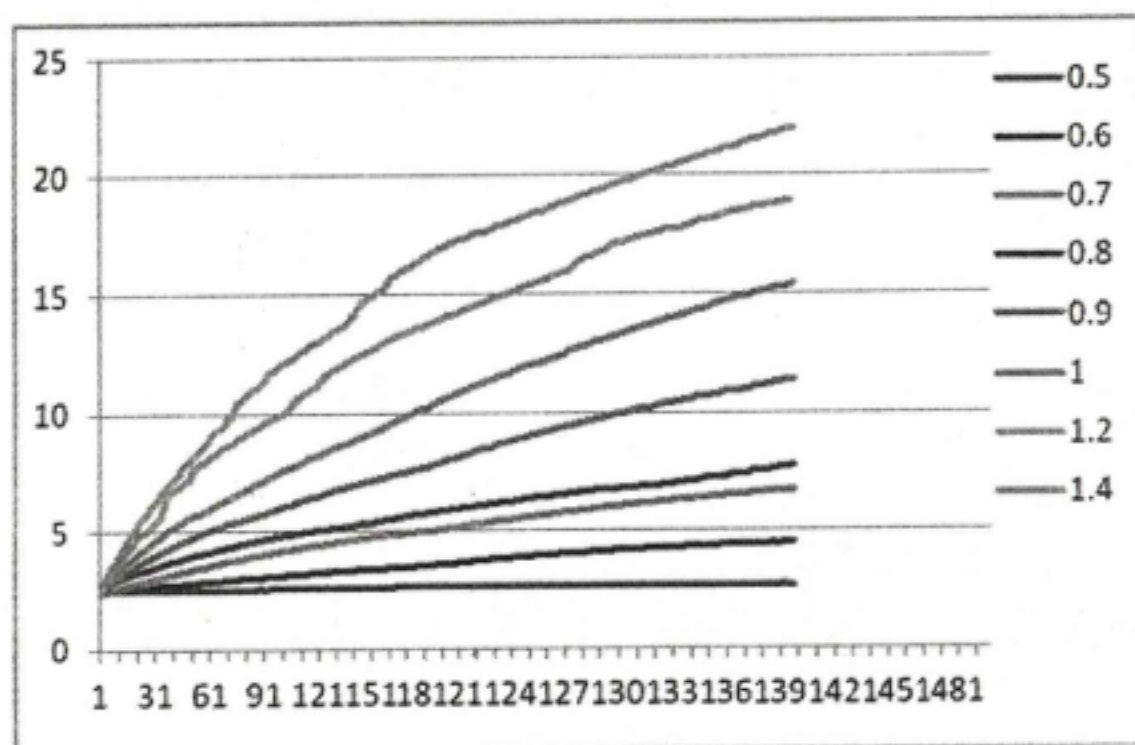


图 3.4 车辆速度随油门电压响应曲线

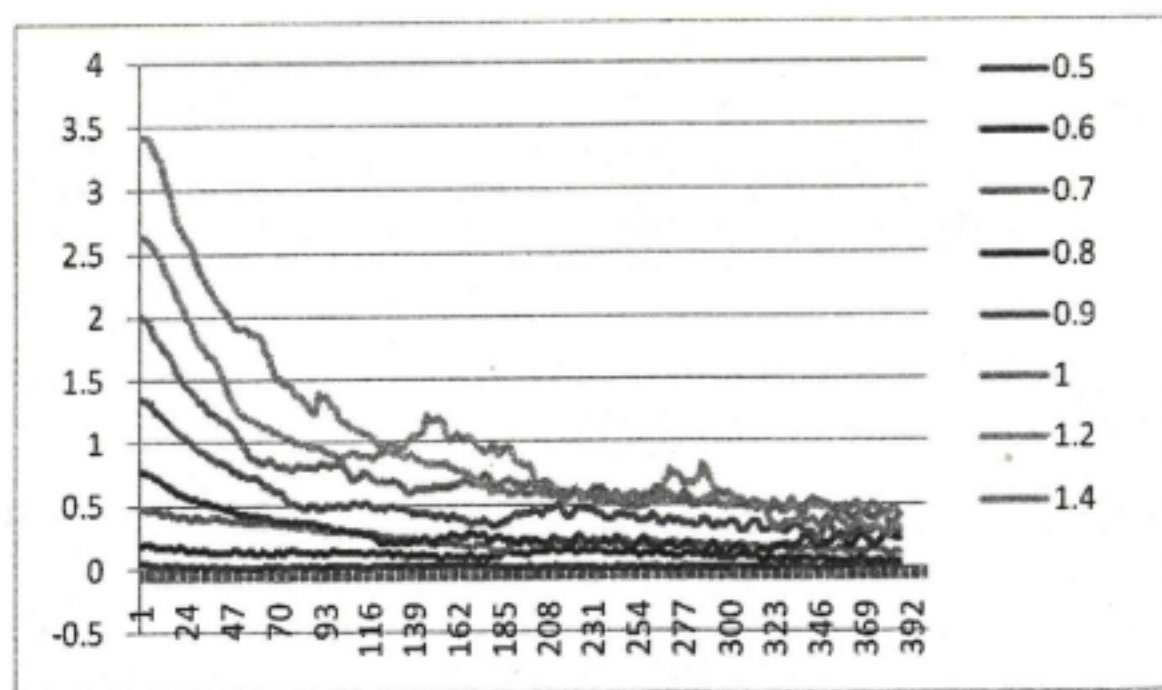


图 3.5 车辆加速度随油门电压响应曲线

(2) 制动性能

“智能先锋”的制动装置包括电机、减速器、编码器和传感机构，减速器为蜗轮蜗杆减速器，输入端连着电机，电机后端输出轴上连接编码器，减速器输出轴连接钢线线轮，利用其拉动原车辆制动踏板。通过控制编码器的编码数给出制动指令，电机接受指令开始运转，连接的钢线开始拉下制动踏板，实现无人驾驶车辆的自动制动。当通过编码数给出松开制动的指令后，电机反转，车辆的制动踏板本身可自动回位。“智能先锋”通过制动电机实现自动制动，其电机的工作范围为-25500~48000。对应不同的制动电机编码值，实验取电压值-36000~48000，实验对 20km/h 行驶的车辆施加不同幅度的制动，车辆速度(m/s)随制动幅度的响应曲线如图 3.6 所示，其采样时间为 50ms。图 3.7 显示了其加速度对应于不同制动幅度的响应曲线。由图可见，在给定制动幅度作用下，速度基本呈线性减小，其加速度近似为一个相应的稳态值。

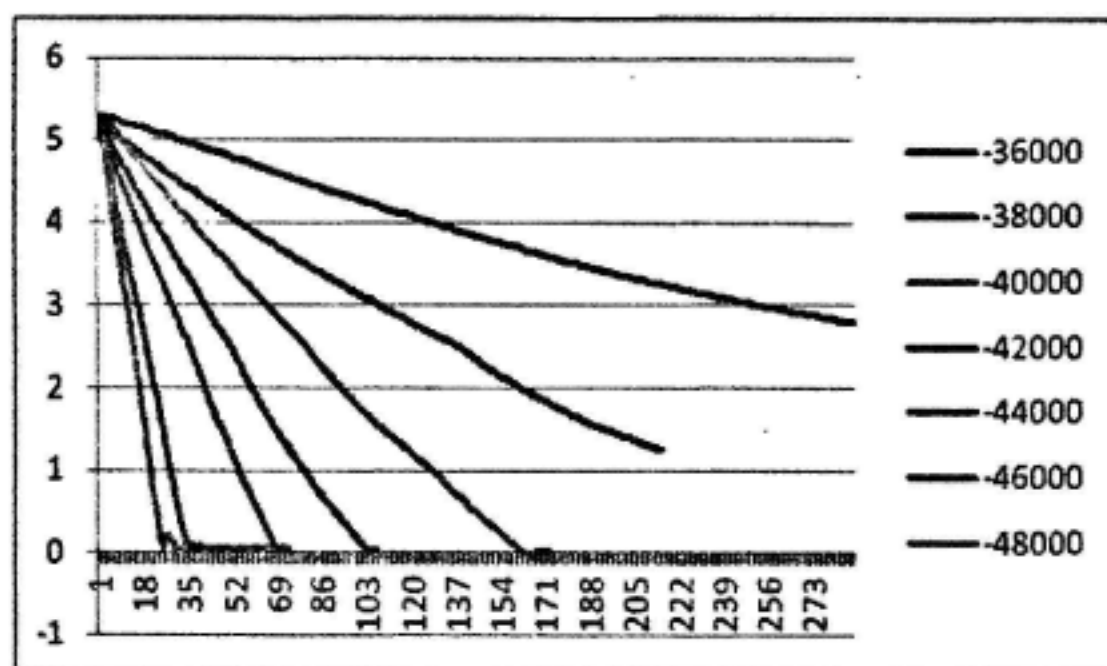


图 3.6 车辆速度随制动幅度响应曲线

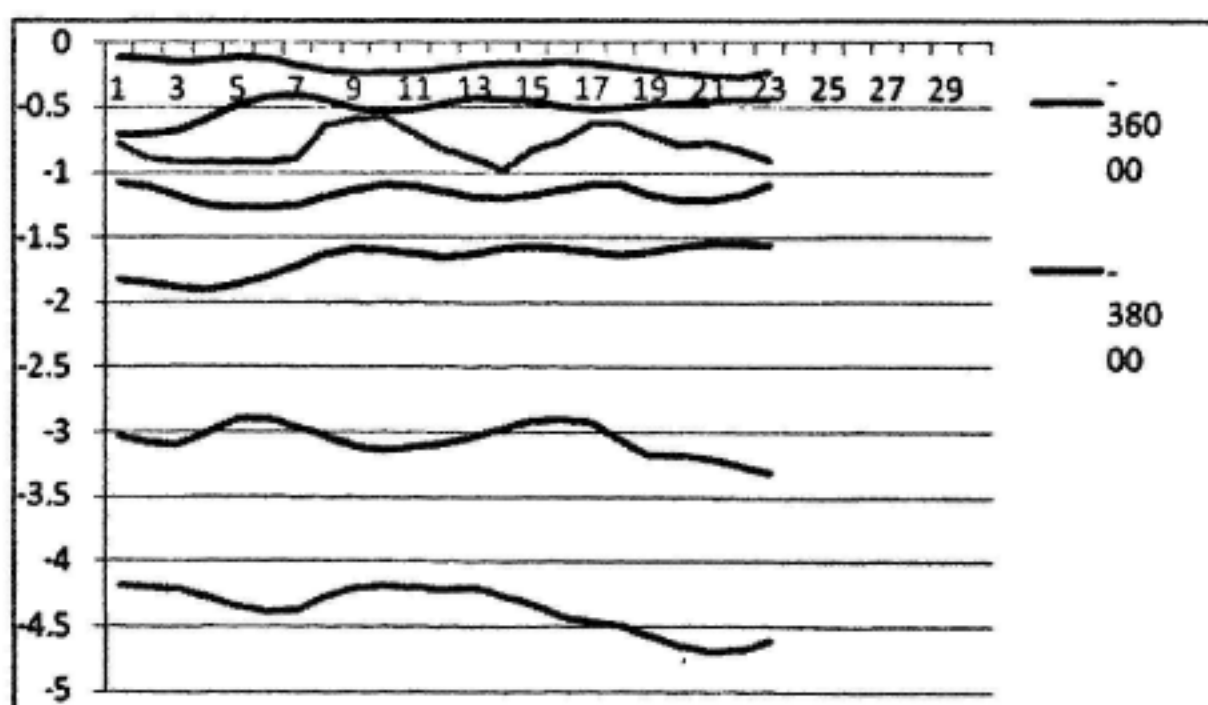


图 3.7 车辆加速度随制动幅度响应曲线

3.3 建立基于规则的专家 PID 速度控制系统

3.3.1 专家控制理论

自动控制系统理论中存在大量的难以用规定数值表示的逻辑概念,因为在普通的工业控制过程中,其控制对象和所处环境变化较为复杂,呈现出非线性的特点。因此,需要采用人们在长期实践过程中积累的各种经验知识,这种知识适用于符号形式表述,专家系统理论就为这些人类累积的经验提供了有效的表示和处理方法,它也是人工智能中重要的应用领域。

专家系统理论于 1980 年兴起,之后许多从事研究自动控制科学的学者也开始在自动控制领域的研究与应用之中融入专家系统的思想。专家系统是一种建立在专家知识表示之上的系统,它通过知识推理达到系统的任务指标,在解决各种结构化程度不高的问题中,作用很大,特别是知识内容的描述具有不定量、模糊等特点。专家系统理论为解决经典控制方法过于依赖数字形式表达的局限性提供了新的思路,专家控制系统便成为了专家系统理论与经典自动控制理论相结合的产物。

1. 专家控制系统定义和特点

人工智能的思想,尤其是专家系统理论推动了控制学科的发展。1983 年,瑞典学者 Astrom K.J.(1986) 提出了专家控制的概念,他将专家系统的思想引入自动控制领域,对专家控制进行了比较深入的阐述,并开展了一系列系统实验。经过控制界专家学者近 20 多年的研究工作,专家控制系统在深度和广度上都得到了一定的发展。

定义:对人类专家的经验进行总结,建造出一种基于专家控制参数的控制系统,并且符合专家系统的概念要求,这种控制系统称为专家控制系统。

专家控制系统的任务要求是在不可测环境条件下,利用专家的经验,结合现有控制理论与技术,对系统进行控制,达到理想的效果。

专家控制系统除了具有专家系统本身所具有的特征以外,还拥有以下特征:

- 1) 具有基于时间序列的知识表示及推理方法。一般的专家系统的知识表示往往是和时间序列无直接关系的,但对于专家控制系统则要求在线的采集数据,并准确地表示控制系统的实时特性,从而进行数据时序推理、及时决策和控制。
- 2) 具有很强的实时性。专家控制系统的实时性非常重要,要求具备以下几点:控制策略、数据管理、经验表示的灵活性和模式匹配等方面需要具备灵活性;推理能力强,同时要求推理机构应尽可能简单;信息采集及

处理能力强运行可靠性高；专家控制系统对被控过程或对象进行实时控制是，必须在每个采样周期内都给出控制信号，因此对专家系统运算速度的要求也很高。

- 3) 接受来自操作者的交互指令序列，并能在线修正序列式基本控制知识。
- 4) 决策和控制能力强。能够处理随机性、不完整性和不准确性任意时变非线性系统的控制问题，该类常规控制方法难以解决的问题。
- 5) 具备与计算机控制等应用系统的通用性。对于专家控制器，应该能够方便地嵌入到计算机控制系统中，对于专家控制系统要能与 SCADA 进行灵活地连接。

2. 专家控制系统的基本原理

- 1) 专家控制的最终目标是应用于实际生产生活当中；
- 2) 当外部环境复杂多变时，具有很强的抗干扰性，同时，不受控制对象时变、线性程度较低的影响；
- 3) 专家控制的运行对对象的先验知识依赖较少；
- 4) 具有在线学习功能，能够随着系统的运行，补充知识库、改进控制效果；
- 5) 专家控制系统应当接受用户对控制效果定性的描述，例如“控制周期尽可能小”、“控制效果尽可能好”等；
- 6) 具有故障自诊断功能，当控制环节中的传感器或者机构出现错误时，控制系统可以得到反馈，在可能修复的时候，应主动修复；
- 7) 应具有合理的人机交互界面，用户可以自由地得到控制系统内部的执行信息，例如传感器的反馈信息，控制系统的动、静态特性等等。

一般来说，传统控制理论和技术的成就及特长在于它针对精确描述的解析模型进行精确的数值求解。即它的着眼点主要限于设计和实现控制系统的各种核心算法。而专家控制的基本原理是面对一些启发式逻辑，试图采用形式化的方法，将这些启发式逻辑组织起来，进行一般的处理，从它们与核心算法的结合上使传统控制表现出较好的智能性。与经典控制理论不同，专家控制的作用和特点在于依照完整描述的受控过程知识和经验，经过推理决策，以获得更好的控制性能(孙增圻,等, 1997)。

由于专家控制系统被控对象和控制器的模型不局限于单纯的解析模型，它有多多样化的表现形式，如知识模型、物理模型、模糊模型、神经网络模型和基于离散事件的模型等。由于专家控制器模型的多样性，其实现方法多种多样。大体上可分为两类：一类是具有简单的专家控制结构，简洁的知识库和简单合理的推理结构；另一类是建立在现有控制算法上的专家控制系统，在线调节控制器，提高其智能性。第二种虽然不如第一种完善，但其实时性较高，控制效果良好，前景

广阔。

3. 专家控制系统的基本结构

由于对实际应用中对专家控制系统的控制要求不同, 所选择表现形式不同, 因此专家控制系统的结构也不尽相同。但是, 几乎所有的专家控制系统都具有这样的基本组成: 知识库(Knowledge Base)、推理机(Inference Engine)、综合数据库(Global Database)、解释接口(Explanation Interface)和知识获取(Knowledge Acquisition)等。专家控制系统的基本结构如图 3.8 所示。

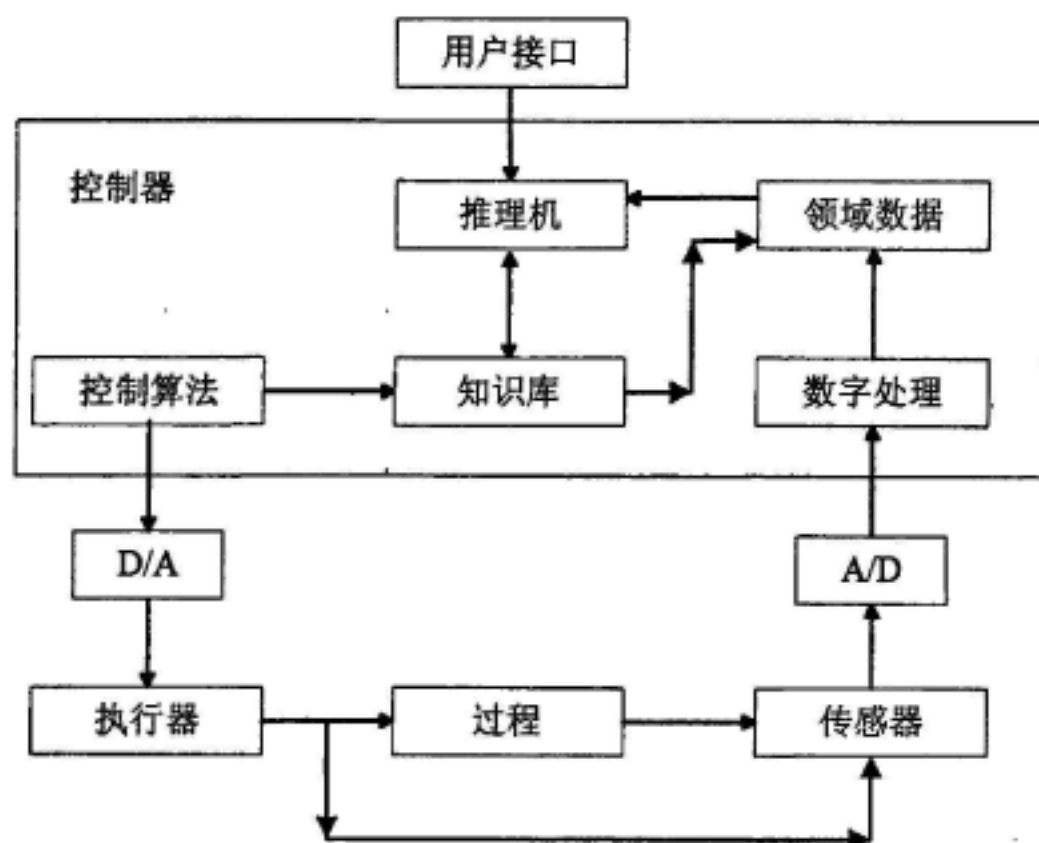


图 3.8 专家控制系统典型结构

专家控制系统的基本结构具有以下特点(王顺晃,等, 2005):

(1)专家控制的结构主要包括数值计算方法和知识库子系统。其中前者包括控制、辨识和监控三部分算法, 它们的处理过程面向定量的知识, 对其进行计算; 而后者面向的是抽象的知识, 运用符号形式进行计算。这两大部分体现了知识的不同属性, 同时也符合智能控制过程中的分层原则, 呈现出递阶控制的特点。不同的是, 在编码上, 数值计算方法可以运用常规编程的方式, 而知识库子系统则必须符合专家系统的编码规范; 计算速度上, 前者快速、准确, 而推理过程则较缓慢。

(2)三部分过程并行处理。三种过程-数值计算方法、知识库系统、人机通讯, 在实际的计算机应用中是并行处理的, 数值计算方法的优先级最高。人机通讯与知识库系统是不经中转地通讯, 而数值计算方法则要通过一定的中转。数值计算方法可以按照其周期终止人机通讯。专家控制系统的这种并行处理机制是确保系统及时性的重要措施, 其过程结合相当紧密。

3.3.2 专家 PID 控制原理

常规 PID 控制算法可以表示为

$$\begin{aligned} u(t) &= K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \\ &= K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \end{aligned}$$

式中, T_i , T_d 分别为控制器积分时间常数和微分时间常数; K_p 、 K_i 、 K_d 为控制器的比例系数、积分系数和微分系数。

当采用增量式 PID 控制方式时, 其算法的数学递推表达式为

$$\Delta u_i = K_p \Delta e_i + K_i e_i + K_d (\Delta e_i - \Delta e_{i-1})$$

式中, $u_i = u_{i-1} + \Delta u_i$, $\Delta e_i = e_i - e_{i-1}$, $\Delta e_{i-1} = \Delta e_{i-1} - \Delta e_{i-2}$ 。

常规 PID 控制一般根据控制过程的动态及稳态特性来整定控制器的各参数, 但当控制对象随时间空间发生变化, 或被干扰影响时, PID 控制器不容易达到原先预期的最佳的设定值跟踪效果和干扰量抑制, 甚至容易因此产生振荡。为了解决常规 PID 控制在这一方面的缺陷, 结合专家控制系统思想设计专家 PID 控制器是一种有效的方法(王威,等, 2008)。

专家控制系统是在专家系统的基础上, 运用其专业内已有知识, 学习领域专家的控制方法与过程进行规则推理的自控系统(蔡自兴, 2004)。将专家控制与 PID 控制器相结合便构成专家 PID 控制器。

对于一般的二阶系统其单位阶跃响应的误差曲线如图 3.9 所示。

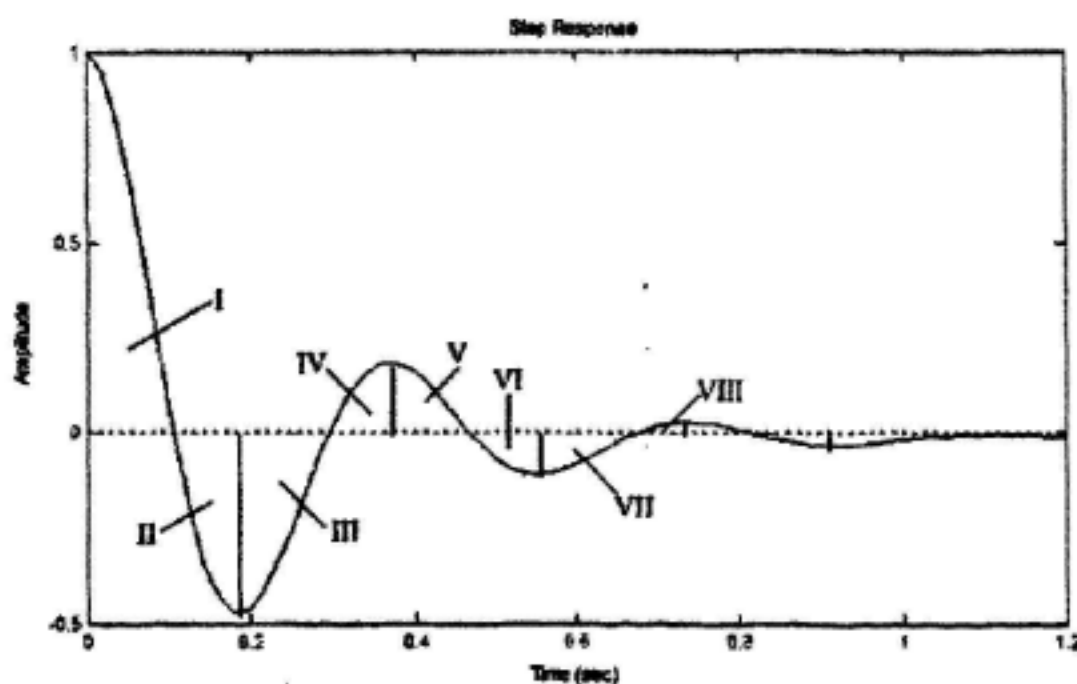


图 3.9 典型二阶系统单位阶跃响应误差曲线

系统的设计方法是根据误差、误差变化的特征, 设计专家 PID 控制器, 其

PID 参数的调整规则列举为以下几条：

(1) 当 $|e(t)| > M_1$ 时，表示此时系统输出误差很大，应实施开环控制，控制器的控制量应按所允许的最值控制，系统可以快速调整误差，便于其尽快减小。

(2) 当 $e(t)\Delta e(t) > 0$ 时，说明误差在向远离平衡点的方向变化，此时若 $|e(t)| \geq M_2$ ，由控制器输出较大的控制作用或开环作用，若 $|e(t)| < M_2$ ，由控制器则逐渐减小控制作用。

(3) 当 $e(t)\Delta e(t) < 0, \Delta e(t)\Delta e(t-1) > 0$ 或 $e(t) = 0$ 时，说明误差在向平衡点的方向变化，或在平衡点附近摆动，或已达到稳定点，这个时候使系统控制量恒定。

(4) 当 $e(t)\Delta e(t) < 0, \Delta e(t)\Delta e(t-1) < 0$ 时，表明系统偏差极大或极小。若 $|e(t)| \geq M_2$ ，则由控制器输出较大的控制作用或开环作用；若 $|e(t)| < M_2$ ，则逐渐减小控制作用。

(5) 当 $|e(t)| < \varepsilon$ 时，此时控制误差接近 0，应主要有积分环节作用以减小稳态误差。

上述参数中， M_1 ， M_2 为两种状态的误差界限，其中 $M_1 > M_2$ ， ε 为足够小的正实数。

3.4 速度控制的专家 PID 控制设计

根据以上原理，设计一种专家 PID 控制器用来模拟人类的行为实现车辆的自动驾驶，控制器的设计目的是为了控制车辆的油门和制动，以获得舒适平稳的驾驶行为来保持恒定的速度或快速跟踪期望速度的变化。为此，被用作控制器的输入的两个参数为：

(1) 速度误差：车辆当前速度值与设定的期望值之差。

(2) 加速度：车辆当前速度的时间导数。

其中，期望速度值由决策系统提供，车辆当前的速度和加速度可以通过 GPS/IMU 信号系统获得。

控制器将提供两个输出信号，一个用于油门，另一个用于制动。根据“智能先锋”的执行机构特点，用于油门的输出量是直接施加在电子油门的电压值，用于制动的输出量是控制电机编码器的编码值。

3.4.1 油门控制

油门控制的主要目的是使车辆跟踪期望车速行驶，即当车速低于期望速度时，控制器将提供合适的加速度；当速度达到期望速度时，控制器将提供稳定的动力维持当前速度。其结构如图 3.10 所示，设计具体专家规则如下：

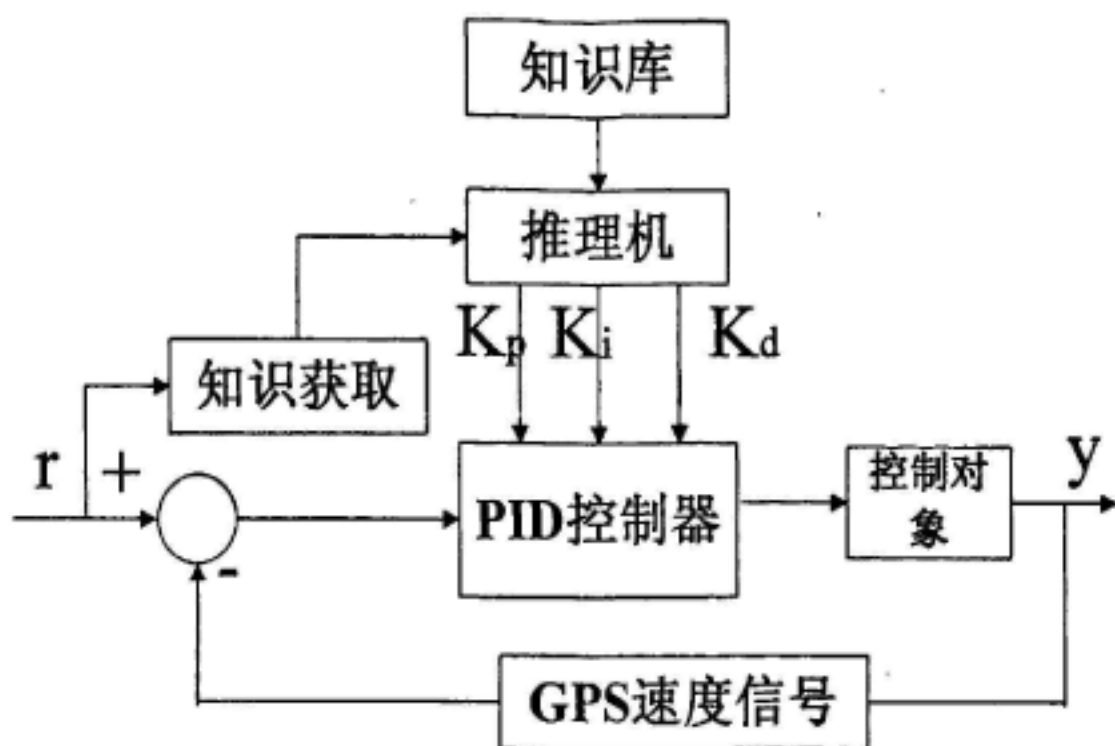


图 3.10 专家 PID 控制结构图

专家规则 1 期望输入值 R_i 对 PID 控制参数的修正系数 K_{Ri} 。

根据无人驾驶车辆的不同行驶状态，往往需要调整在不同给定速度下的 PID 参数。根据前面对“智能先锋”纵向动力特性的分析，节气门开度与加速度的关系受车辆行驶速度的影响，不同的设定速度，其动态特性不同，需要不同的 PID 参数才能达到最优的控制效果。如果给定速度较低，则需要发动机提供的输出动力较小，所以油门的给定电压值较小，具体修正系数参见表 3.1。

表 3.1 期望输入值 R_i 对 PID 控制参数的修正系数 K_{Ri}

R_i	10km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
K_{Ri}	0.61	0.65	0.69	0.72	0.75
R_i	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h
K_{Ri}	0.79	0.82	0.87	0.92	1.00

专家规则 2 速度误差 e_i 对 PID 控制参数的修正系数 K_{ei} 。

根据控制精度的要求，把速度误差 e_i 分为三种情况分别控制： $\pm 5\text{km/h}$ 为理想过程区域，该区域以稳定运行为主，可减少油门电压信号变化，修正的系数较小。 $\pm 5\text{km/h} \sim \pm 20\text{km/h}$ 为加速或减速过程，在该误差区间内控制器应增大修正系数，加快响应速度。此时应主要增大 K_p 的修正系数，使误差迅速减小。 $\pm 20\text{km/h} \sim \pm 30\text{km/h}$ 是误差较大的区间，系统处于该过程过大的误差可能会产生较大的输入量，此时为了不出现油门过度调整而使车体产生较大的闯动，需要降低 PID 各参数，尤其是减小 K_i ，使车辆能够平稳的加减速。具体修正系数参见表 3.2。

表 3.2 速度误差 e_i 对 PID 控制参数的修正系数 K_{ei}

$ e_i $	0 km/h	2 km/h	4 km/h	6 km/h	8 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h
K_{pei}	0.65	0.75	0.87	1.0	1.1	1.2	1.32	1.5
K_{iei}	0	0	0	0.75	0.8	1.0	1.1	1.1
K_{dei}	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0	1.25	1.25
$ e_i $	16 km/h	18 km/h	20 km/h	22 km/h	24 km/h	26 km/h	28 km/h	30 km/h
K_{pei}	1.5	1.25	1.0	0.85	0.8	0.75	0.7	0.6
K_{iei}	0.9	0.85	0.75	0.7	0.6	0.55	0.5	0.4
K_{dei}	1.0	1.0	0.9	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7

专家规则 3 速度误差变化率 Δe_i 对 PID 控制参数的修正系数 $K_{\Delta ei}$ 。

用 $|\Delta e_i|$ 表示速度误差的变化率，若 $|\Delta e_i|$ 过大系统可能会引起振荡，此时应减小 PID 的修正系数，抑制系统的振荡过程。具体修正系数参见表 3.3。

表 3.3 速度误差变化率 Δe_i 对 PID 控制参数的修正系数 $K_{\Delta ei}$

$ \Delta e_i $	0 km/h	1 km/h	2 km/h	3 km/h	4 km/h
$K_{\Delta ei}$	1.15	1.00	0.85	0.7	0.6

专家规则 4 控制值 u_i 的限幅。

如果 PID 控制量 u_i 是发动机油门电压值，则应根据发动机的特性进行限幅，最大值和最小值可以根据经验输入计算机，也可以由计算机自动整定。最大值不能使发动机超过最大输出功率，最小值是随着速度误差而变化的，即根据速度误差要乘上相应的修正系数。具体修正系数参见表 3.4。

表 3.4 控制值 u_i 的限幅

e_i	0 km/h	2 km/h	4 km/h	6 km/h	8 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h
K_{ui}	1.0	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65
ei	16 km/h	18 km/h	20 km/h	22 km/h	24 km/h	26 km/h	28 km/h	30 km/h
K_{ui}	0.65	0.6	0.6	0.55	0.55	0.5	0.5	0.4

根据上述专家规则，可以通过查表计算，在上次 PID 参数的基础上得到本次的 PID 参数。满足公式：

$$\begin{aligned}
K_{pt} &= K_{pt-1} \cdot K_{Rt} \cdot K_{pe_t} \cdot K_{\Delta e_t} \\
K_{it} &= K_{it-1} \cdot K_{Rt} \cdot K_{ie_t} \cdot K_{\Delta e_t} \\
K_{dt} &= K_{dt-1} \cdot K_{Rt} \cdot K_{de_t} \cdot K_{\Delta e_t} \\
\Delta u_t &= K_{pt-1} \Delta e_t + K_{it} e_t + K_{dt} (\Delta e_t - \Delta e_{t-1}) \\
u_{\min} \leq u_t &= u_{t-1} + \Delta u_t \leq u_{\max}
\end{aligned}$$

3.4.2 制动控制

制动控制的主要目的是使车辆减速和停车，即当车速高于期望速度时，控制器将提供合适的加速度，在减速时，为了避免减速危险，不宜输出过大制动，但发生紧急停车的状况时，控制器应提供最大的制动力。由于车辆速度的跟踪精度是由油门控制保持的，只有当车辆当前速度高于期望速度时才采用制动控制，实施控制主要以开环模式为主，设计具体专家规则如下：

- 1) 当 $e(k) < 0$ 时，加速过程， $u_{brake} = 0$ ；
- 2) 当 $|e(k)| < 5$ 时，车速保持过程， $u_{brake} = 0$ ；
- 3) 当 $e(k) > 5$ ，并且 $\Delta e(k) > 0$ 时，车速过高并且加速度为正（如下坡行驶），需要提供较大的制动力， $u_{brake} = -44000$ ；
- 4) 当 $e(k) > 5$ ，并且 $\Delta e(k) \leq 0$ 时，车速过高并且车辆正在减速，需要提供较小的制动力， $u_{brake} = -40000$ ；
- 5) 当 $e(k)$ 很大，并且期望车速为 0 时，表示车辆需要紧急停车，此时应提供最大制动力， $u_{brake} = -48000$ 。

3.5 速度控制测试实验

为了验证控制器的效果，本文设计了若干实验。图 3.11 显示实验场地的航拍图与实景图，它的路面包含一些起伏，用来测试在不同环境条件下控制器的准确性。这些实验的目的主要是测试控制器保持恒定速度的性能，以及期望速度改变时的跟踪能力。在实验中，汽车转向是手动控制，油门和制动踏板为自动控制，实验分析了车辆在达到和保持目标速度过程中的速度及误差反馈数值，并将跟踪效果与人驾驶车辆的速度控制行为进行比较。

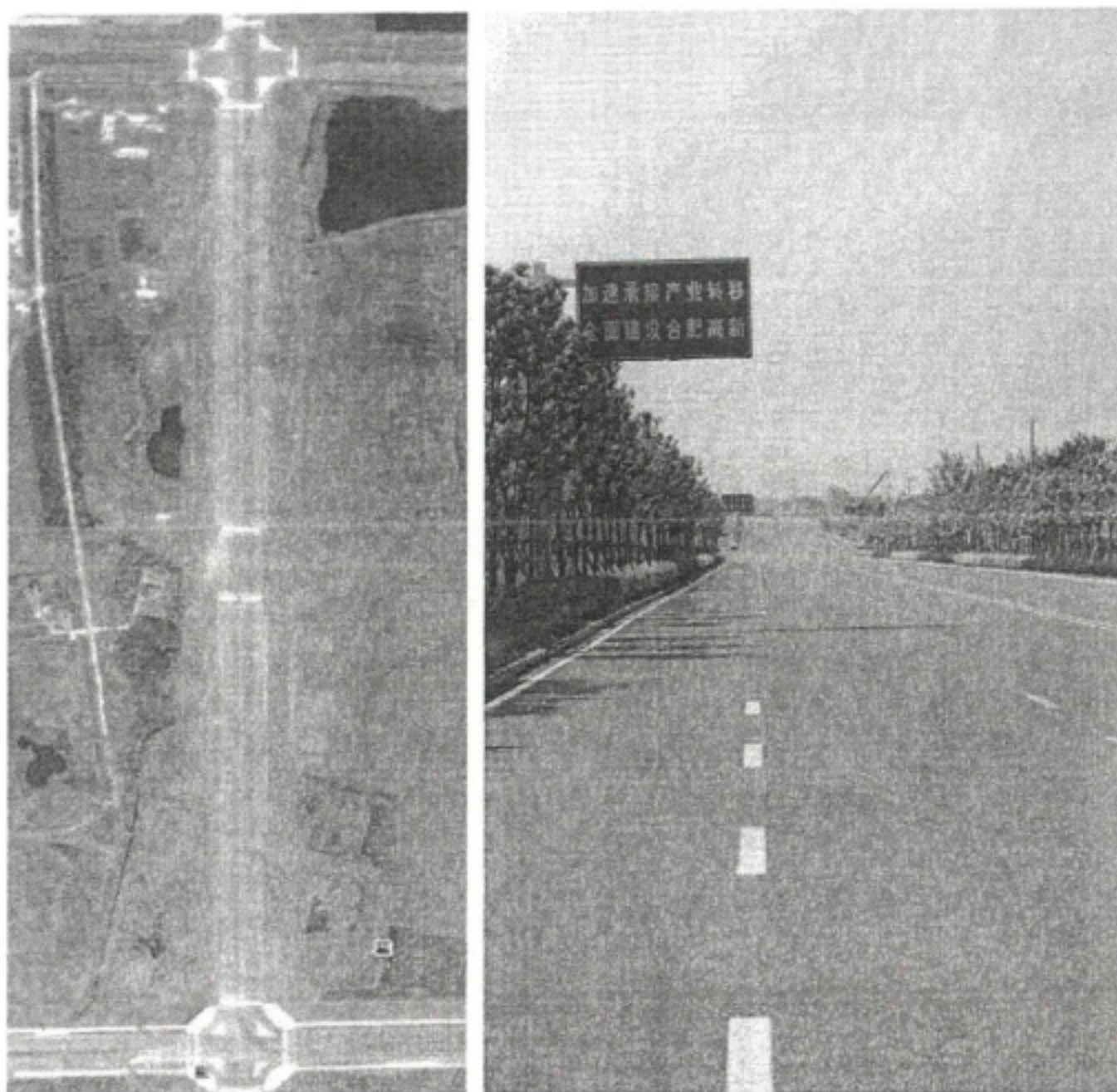


图 3.11 速度测试实验场景

(1) 驾驶员驾驶车辆速度控制和车载定速巡航系统的速度控制效果

为了验证本文所设计的速度控制系统的性能，首先通过 GPS 采集了人驾驶车辆时，以及车辆配置的定速巡航系统对车辆速度控制的效果，实验设定两种模式下分别跟踪 40km/h 和 80km/h 的速度，结果显示在以下图中：图 3.12 记录了驾驶员跟踪 40km/h 时对车辆的速度控制过程，由图可见地面的上下坡度对速度控制的影响较大，误差范围为-5~1km/h。图 3.13 记录了车载定速巡航系统跟踪 40km/h 时对车辆的速度控制过程，由图可见其跟踪效果同样受路面的上下坡度影响，并且在上坡和下坡路段存在不同的稳态误差，其误差范围为-2~0.5km/h。图 3.14 记录了驾驶员跟踪 80km/h 时对车辆的速度控制过程，由图可见驾驶员驾驶车辆时，对速度的控制是不断调整的，其动态误差较大，误差范围为-6~2.5km/h。图 3.15 记录了车载定速巡航系统跟踪 80km/h 时对车辆的速度控制过程，由图可见其跟踪效果受路面的上下坡度影响，其误差范围为-2.5~1km/h。

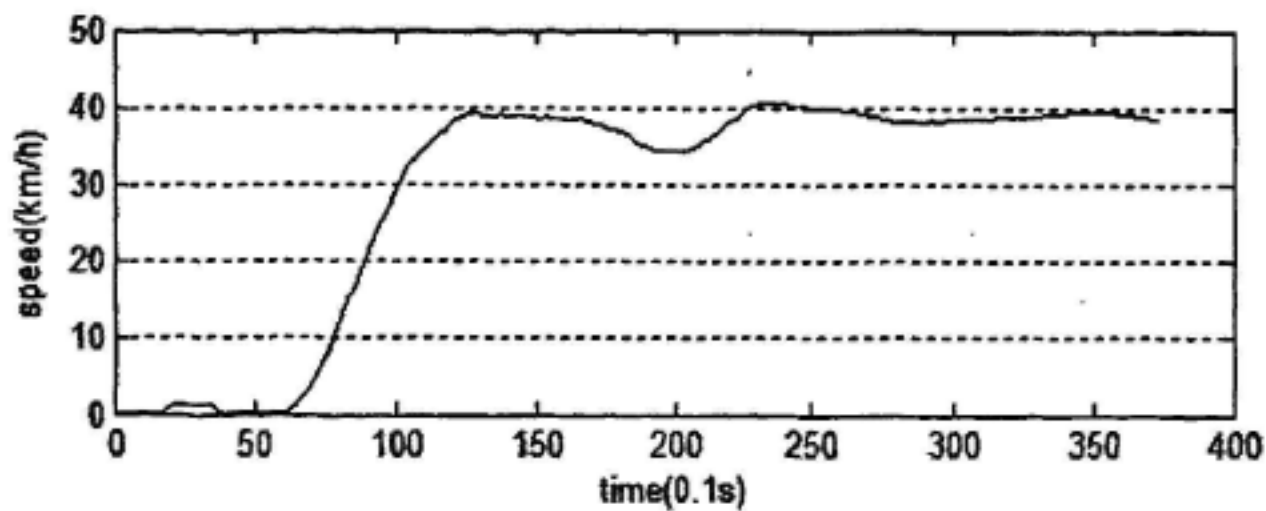


图 3.12 人类驾驶员 40km/h 速度控制速度曲线

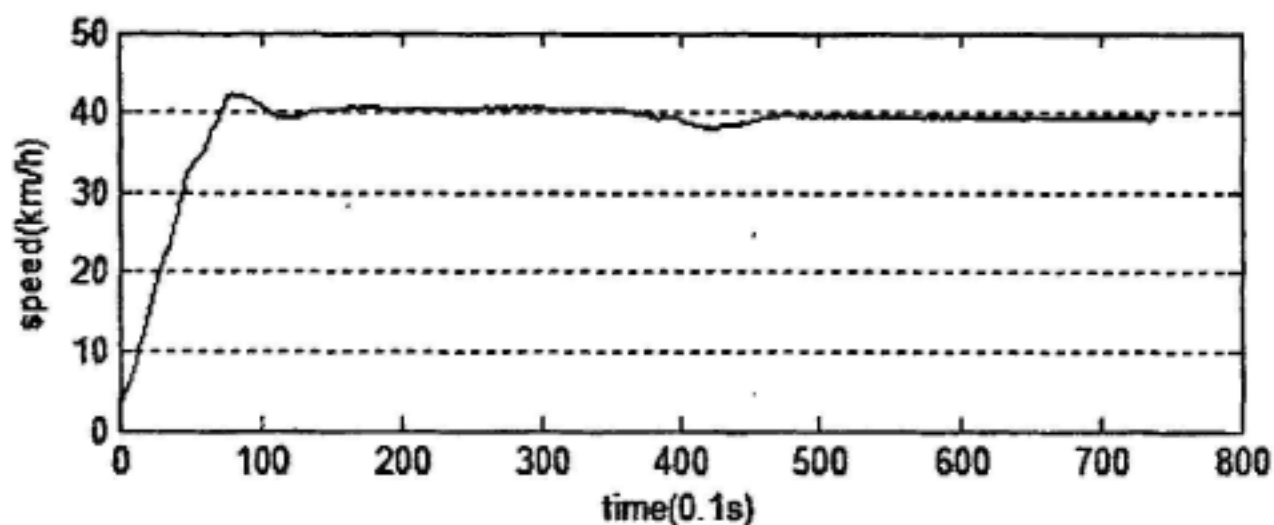


图 3.13 车载定速巡航 40km/h 速度控制速度曲线

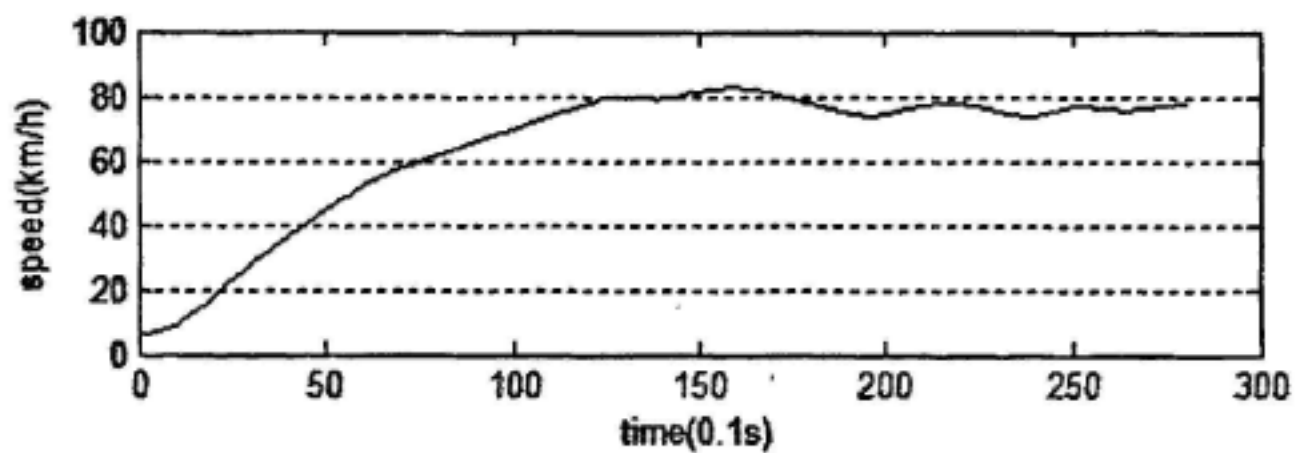


图 3.14 人类驾驶员 80km/h 速度控制速度曲线

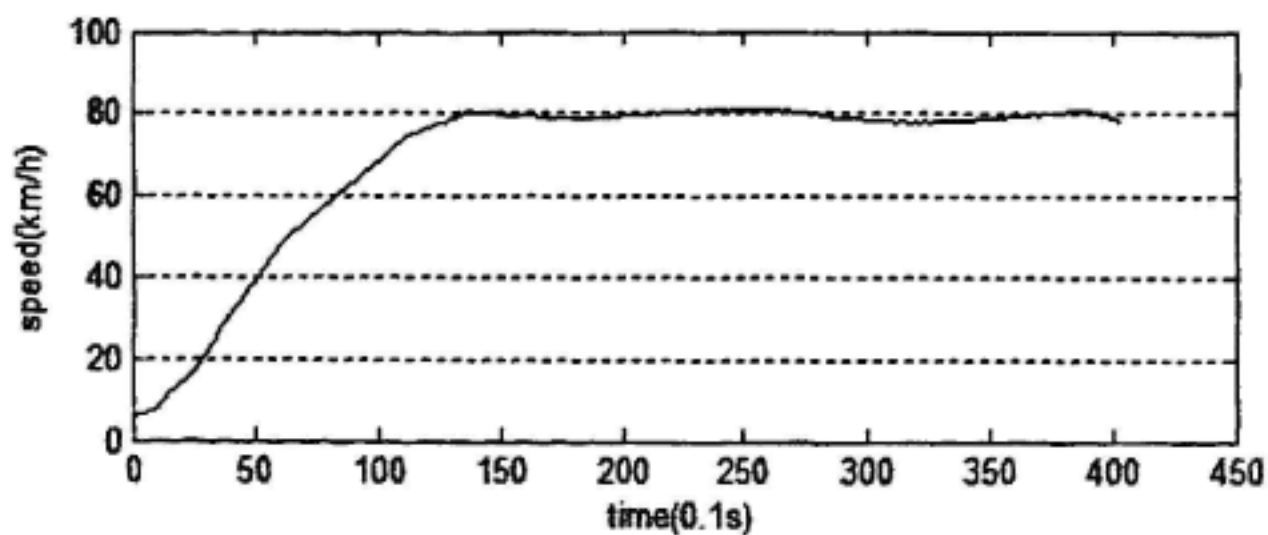


图 3.15 车载定速巡航 80km/h 速度控制速度曲线

(2) 40km/h 速度保持实验

实验结果显示在以下图中：图 3.16 记录了期望速度设定为 40km/h 后，车辆速度变化的过程，由图看出车辆在起步后是一个缓慢加速的过程，这一过程也符合人类驾驶员的起步时的行为。在第一个 10s 之内，车辆平缓加速，在 10s-20s 时车辆进入快速加速的过程，经过 20s 的时间，车辆速度达到期望速度，并平稳地保持该速度行驶。由图看出上下坡的路段对车辆行驶速度没有影响。图 3.17 记录了车辆速度达到期望速度和保持期望速度过程中的速度误差，其误差范围为 -0.4~0.2km/h。图 3.18 和图 3.19 分别记录了行驶过程中控制器的输出和车辆的加速度，其中最大加速度为 0.8m/s^2 ，符合车辆行驶的舒适性和安全性要求。

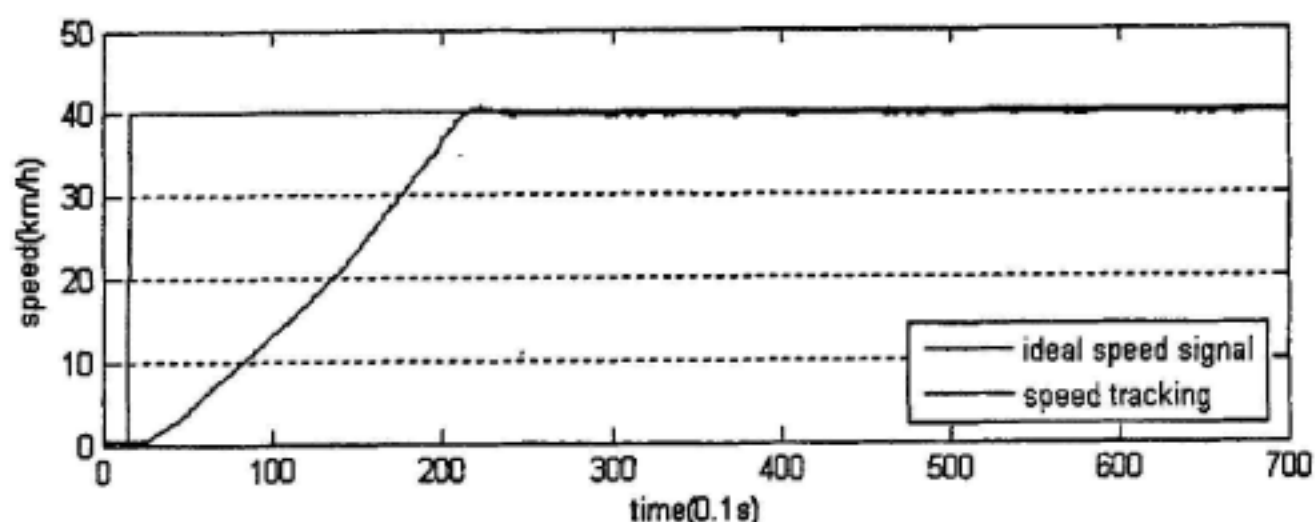


图 3.16 专家 PID 控制器 40km/h 速度控制速度曲线

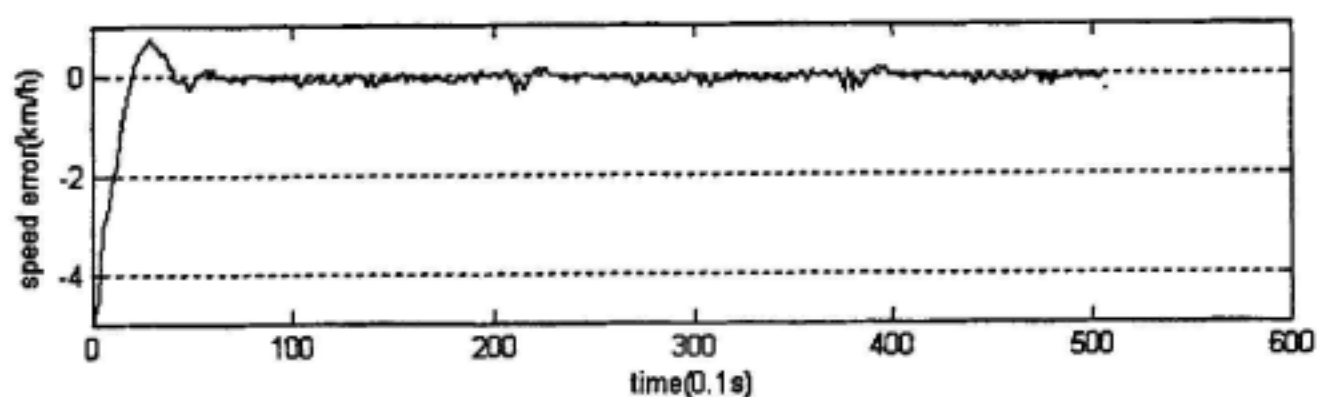


图 3.17 40km/h 速度跟踪误差曲线

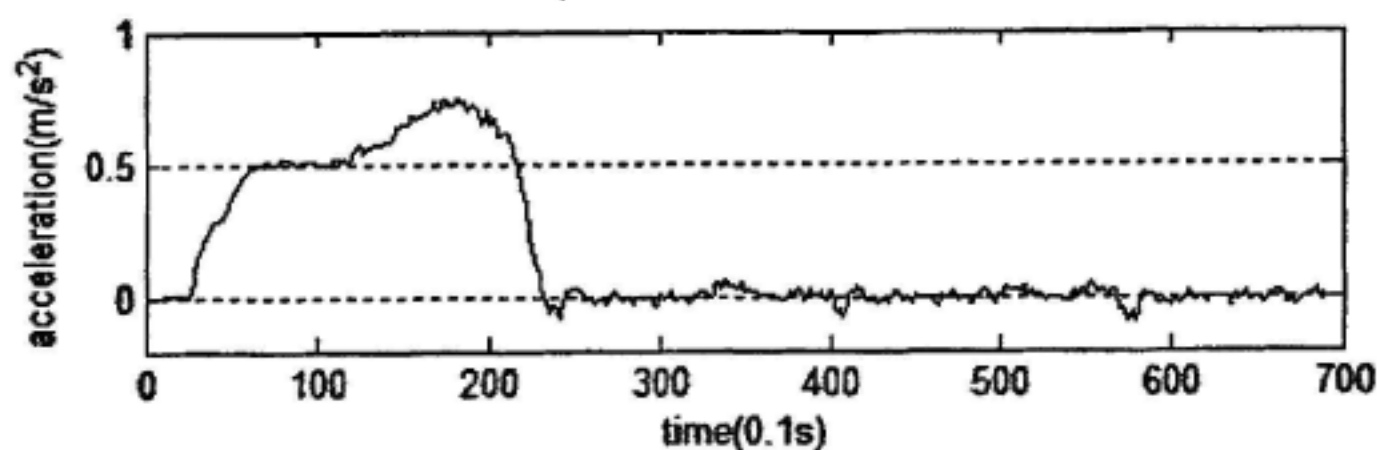


图 3.18 40km/h 车辆行驶加速度曲线

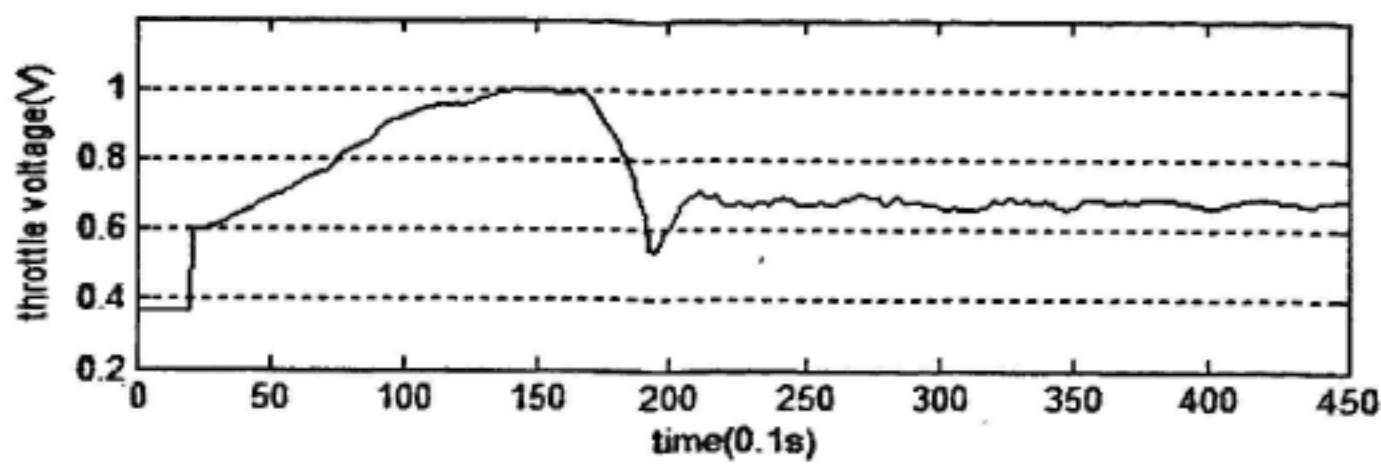


图 3.19 40km/h 控制器输出油门值

(3) 80km/h 速度保持实验

实验结果显示在以下图中：图 3.20 记录了期望速度设定为 80km/h 后，车辆速度变化的过程，由图看出车辆在起步后是一个缓慢加速的过程，这一过程符合人类驾驶员的起步时的行为。在第一个 10s 之内，车辆平缓加速，在 10s-40s 时车辆进入快速加速的过程，经过 40s 的时间，车辆速度达到期望速度，并平稳的保持该速度行驶。由图看出上下坡的路段对车辆行驶速度没有影响。图 3.21 记录了车辆速度达到期望速度和保持期望速度过程中的速度误差，其误差范围为 -0.6~0.2km/h。图 3.22 记录了车辆的加速度，其中最大加速度为 0.8m/s^2 ，符合车辆行驶的舒适性和安全性要求。

表 3.5 驾驶员、车载定速巡航系统和专家 PID 控制的纵向控制器达到期望速度后的速度跟踪误差对比

	驾驶员	定速巡航系统	专家PID控制器
40km/h速度误差	-5~1km/h	-2~0.5km/h	-0.4~0.2km/h
40km/h速度误差	-6~2.5km/h	-2.5~1km/h	-0.6~0.2km/h

表 3.5 列出了以上两组实验要求期望速度下，驾驶员、车载定速巡航系统和本文所设计的基于专家 PID 控制的纵向控制器在达到期望速度之后的速度跟踪误差。结果反映出，本文所设计的控制器对于速度的跟踪性能优于驾驶员、车载定速巡航系统。

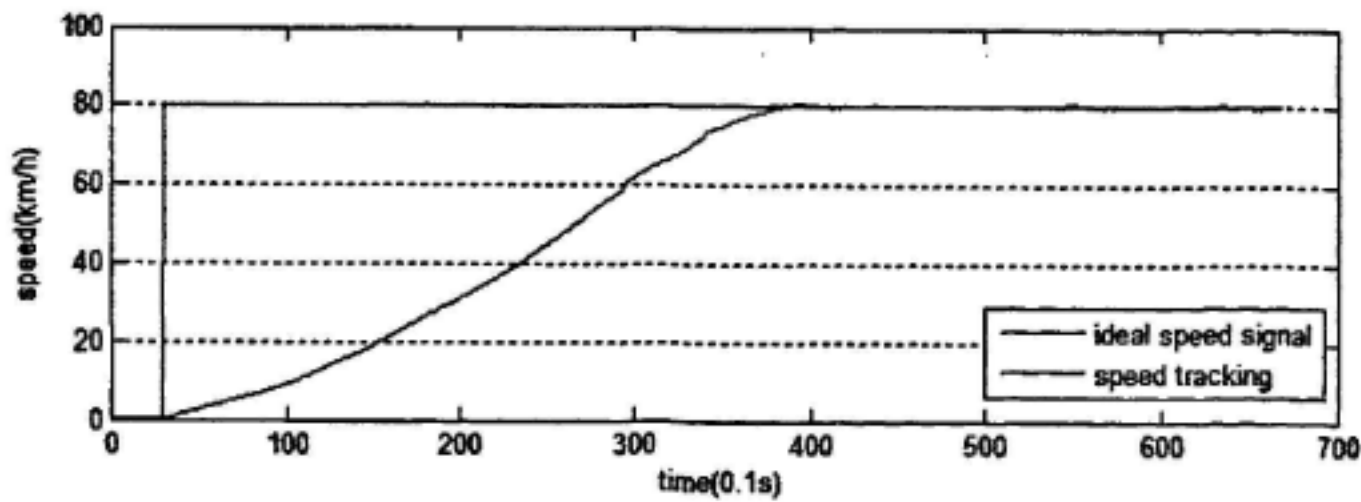


图 3.20 专家 PID 控制器 80km/h 速度控制速度曲线

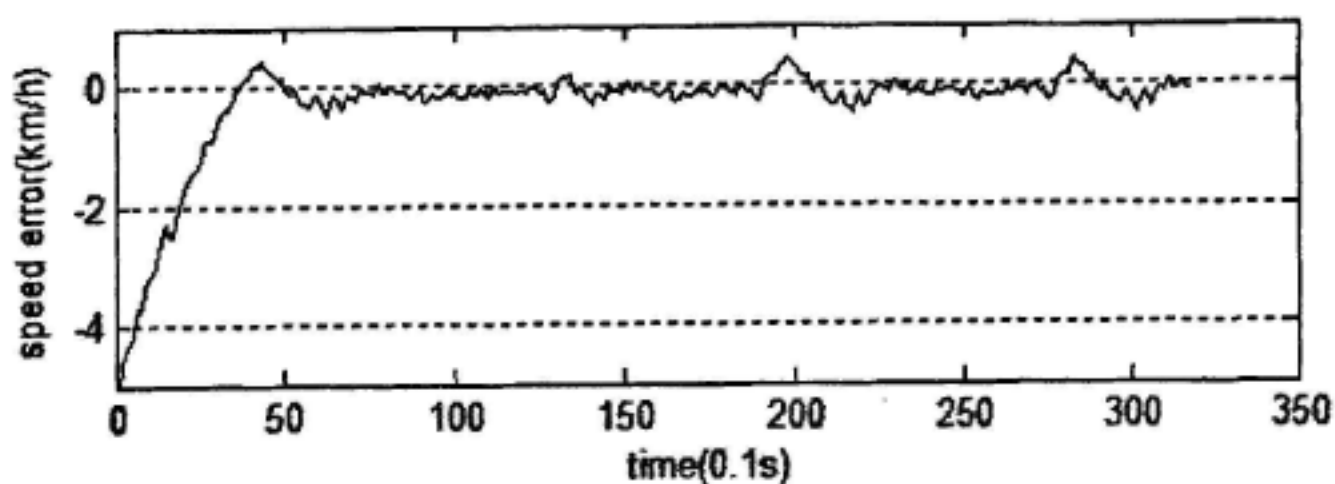


图 3.21 80km/h 速度跟踪误差曲线

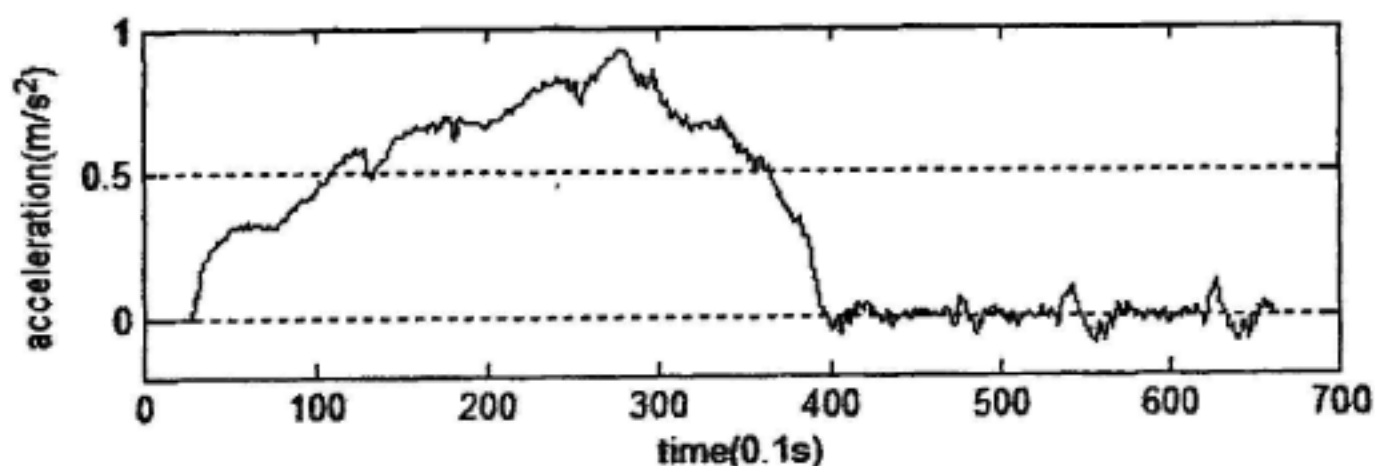


图 3.22 80km/h 速度跟踪加速度变化曲线

(4) 跟踪变化的期望速度

图 3.23 和 3.24 记录了期望速度发生改变时的车辆速度跟踪情况。由图看出，当期望速度发生改变时，控制器控制车辆的速度进行平滑地调整，达到期望速度后能够稳定的保持当前速度。

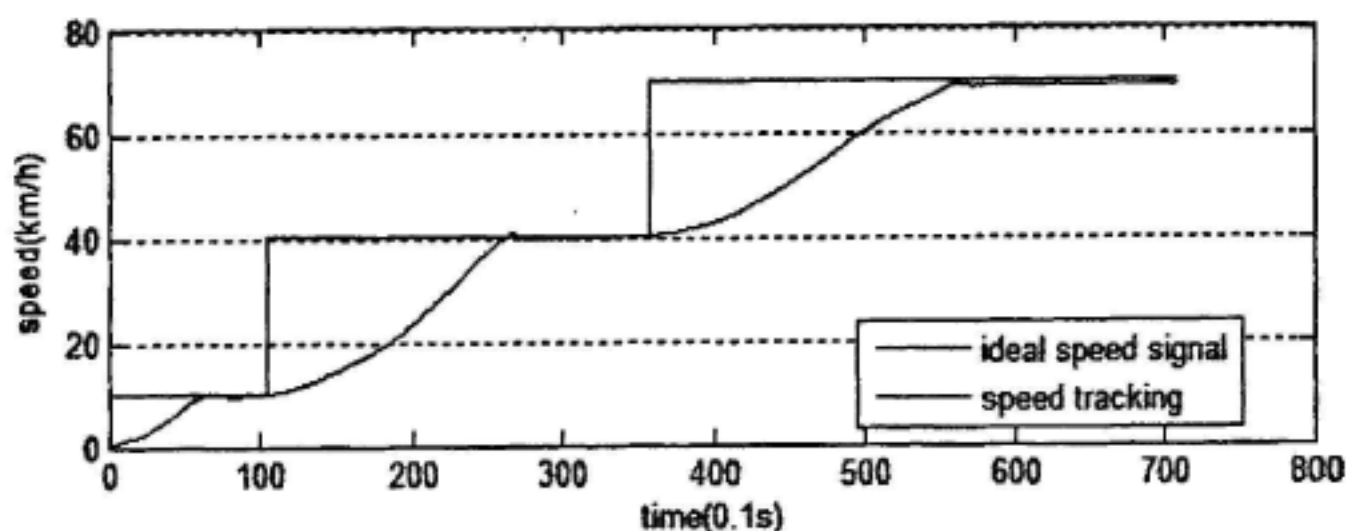


图 3.23 期望速度改变的速度跟踪结果

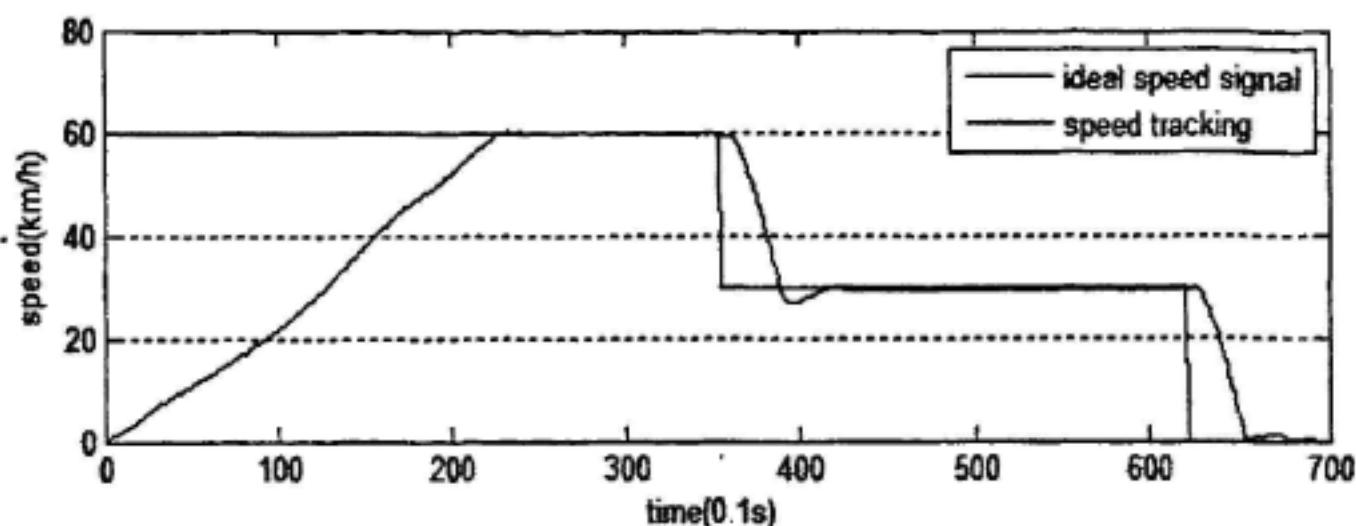


图 3.24 期望速度改变的速度跟踪结果

由实验结果可以得出，专家 PID 控制方法使得车辆的速度控制过程更类似于人类驾驶员的行为模式。专家 PID 控制根据实际驾驶员速度控制的特点的经验建立控制规则和调参规则，具有很强的针对性，因此控制效果要比常规 PID 控制效果好得多。专家 PID 控制不要求控制对象数学模型的精确性。从以上的实验结果看，系统在采用专家 PID 控制方法后具有较好的稳态、动态特性，对于环境和被控对象的变化有较强的适应能力，同时符合车辆行驶的舒适性。

3.6 本章小结

本章首先进行了车辆纵向动力学分析，并讨论了实际驾驶员驾车时对速度控制的行为模式，然后由实验数据分析了“智能先锋”无人车的动力传动特性和制动力学特性。车辆纵向动力学系统的强非线性和易受环境因素影响的特点，结合了“智能先锋”无人车的动力特性和驾驶员驾车时速度控制的经验，制定了专家规则，提出了专家 PID 控制的方法，根据驾驶员的经验建立 PID 参数的调整规则，从而避免了对被控对象模型精确建模的困难，同时提高了速度控制的鲁棒性。最后由实验验证了该控制算法的速度控制精度，符合系统设计的要求，并且对于环境和被控对象的变化有较强的适应能力。

第四章 车辆横向动力学及横向控制方法

本章首先介绍一个最基本的简化两自由度车辆动力学模型,仅考虑车辆的横摆及横向运动,在两自由度基本动力学模型基础上,将无人车辆轨迹跟踪的控制问题描述为状态空间的形式。接着为了控制轨迹跟踪的实时横向误差,结合经典PID 控制方法,在“预瞄—跟随”理论的控制模型的基础上设计了一种小脑模型神经网络与 PID 复合的横向控制器,该控制器可以对不同的环境信息和不同驾驶模式自动进行系统参数优化,从而使无人车能够灵活的在各种道路环境中实现稳定、准确的道路跟踪行驶。最后对以上控制方法的仿真结果进行简单介绍。

4.1 车辆横向控制的数学模型分析

前面的章节介绍了描述车辆横向运动的各种模型,能够用来求解在车辆的设计、分析和评价车辆性能中遇到的不同问题,但越是多自由度的数学模型,就需要车辆的理想化假设条件越多,这种理想假设条件与实际车辆的情况是有着很多差别的。而对于无人驾驶车辆方向盘操作控制,在大多数的横向控制算法设计中,一个简单的“自行车模型”已经能够提供充分准确的动力学描述。

4.1.1 车辆横向动力学模型

最基本的车辆动力学模型可由一单质量刚体来表示,车辆在道路水平面内运动时,受外力和外力矩作用下可分为三个自由度的运动,分别为横向运动,纵向运动和横摆运动。本章讨论车辆的横向运动特性,假设车辆以速度行驶,不考虑纵向动力,只分析横向运动和横摆运动两个自由度的动力学特性。

我们根据车辆的受力情况来建立动力学模型。作用于车辆的外力与外力矩主要有两种,轮胎力和空气动力,驾驶员对车辆运动施加控制的作用机理主要来自于轮胎。轮胎在三维空间上主要受到纵向、侧向及垂直三个方向的作用力,和这三个作用力产生的力矩。车辆速度变化主要纵向作用力影响的结果,车辆的油门踏板和变速器主要对车速进行控制,制动力则通过制动系统使车辆刹车,侧向力则对车辆行驶方向产生影响。驾驶员通过转向系统是轮胎产生一个转向角,以此来控制轮胎的侧向力。轮胎的垂向力的作用是使车辆具有良好的附着性能。而对于一般城市道路车辆而言,空气动力的影响很小,它主要影响着车身的外形设计,我们在车辆控制器的设计问题中可忽略不计(Rajesh Rajamani,2006)。

在以下的理想化假设下，我们建立描述车辆横向运动的简化二自由度基本操纵模型：

- 1) 假设道路平坦，即忽略道路垂直方向起伏所造成的影响，忽略车辆动力学中垂向力影响作用；
- 2) 假设整个车辆是刚性的；
- 3) 输入信号直接作用于车辆前轮，不考虑车辆的方向盘转向系统；
- 4) 忽略空气阻力的影响；
- 5) 假设车辆运动学方程为线性方程。

由于基本模型不考虑轮胎的左右载荷转移，所以也不必考虑车辆的宽度，为了简化计算，我们将四轮车辆模型简化为两轮模型，左右两个轮胎的合力作用在车轴上，生成单轨操作动力学模型，通常被称为“自行车模型”，如图 4.1 所示。

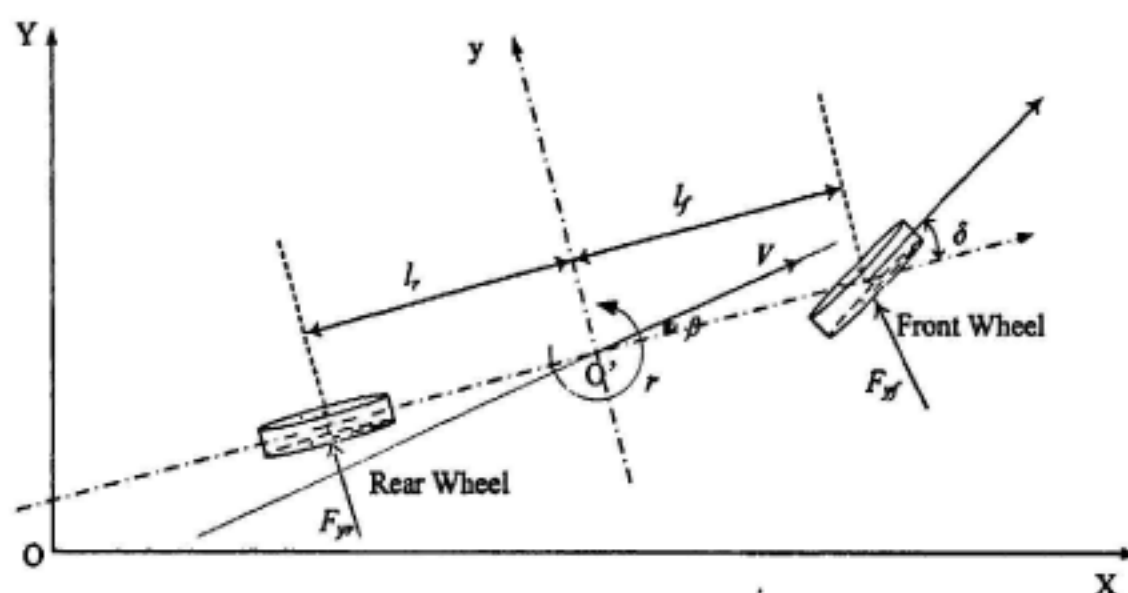


图 4.1 简化二自由度车辆动力学模型

本文研究的无人驾驶车辆平台“智能先锋”的转向方式为前轮转向，其原理是通过机械传动机构将方向盘的转角转换为前轮转向角，以此来操纵汽车的行驶方向。

我们以车辆质心为原点，建立 $O'-xyz$ 坐标，其中 x 轴为车辆运动方向， z 轴垂直与地面向下。车辆的三个自由度分别为：沿 x 方向的前进速度 u ；沿 y 方向的横向速度 v ； r 为绕 z 方向的横摆角速度。分别以 $\sum F_x$ 和 $\sum F_y$ 表示 x 和 y 方向的合外力，以 $\sum M_z$ 表示绕 z 轴的合外力矩，若车辆的质量为 m ，横摆转动惯量为 I ，则系统运动方程写成如下形式

$$m(\dot{u} - vr) = \sum F_x \quad (4.1)$$

$$m(\dot{v} + ur) = \sum F_y \quad (4.2)$$

$$I\dot{r} = \sum M_z \quad (4.3)$$

u 表示车辆质点处的前向速度，数值通常不会很小，所以，可以将 u 写成：

$$u = u_c + \Delta u \quad (4.4)$$

式中， u_c 表示车辆的恒定前进速度，而 Δu 是相对于车速 u_c 的一个扰动量。我们考虑车辆匀速行驶即 $\Sigma F_x = 0$ ，并且在小扰动条件下， Δu_r 和 v_r 的值可以忽略，方程可被解耦，并得到两自由度模型：

$$m(\dot{v} + u_c r) = \Sigma F_y \quad (4.5)$$

$$I\dot{r} = \Sigma M_z \quad (4.6)$$

若前轴两轮胎的侧向合力为 F_{yf} ，后轴两轮胎的侧向合力为 F_{yr} ，车辆质心到前后轴的距离分别为 a ， b 。我们将前后轮的侧向合力分开考虑，则有

$$m(\dot{v} + u_c r) = F_{yf} + F_{yr} \quad (4.7)$$

$$I\dot{r} = aF_{yf} - bF_{yr} \quad (4.8)$$

若已知轮胎侧偏刚度 C ，则有轮胎侧向力 F_y 与侧偏角 α 的关系

$$F_y = -C\alpha \quad (4.9)$$

其中，后轮为非转向轮，因此后轮侧偏角可近似表示为

$$\alpha_r \approx \frac{v - br}{u_c} \quad (4.10)$$

当转向机构对前轮产生一个转向角 δ_f ，定义顺时针为正方向，则前轮侧偏角近似为

$$\alpha_f \approx \frac{v + ar}{u_c} - \delta_f \quad (4.11)$$

代入运动方程(4.7)、(4.8)可得

$$m(\dot{v} + u_c r) = C_f \delta_f - \frac{(C_f + C_r)}{u_c} v - \frac{(aC_f - bC_r)}{u_c} r \quad (4.12)$$

$$rI\dot{r} = aC_f \delta_f - \frac{(aC_f + bC_r)}{u_c} v - \frac{(a^2 C_f - b^2 C_r)}{u_c} r \quad (4.13)$$

将其转化为标准的状态空间方程，形式如下

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (4.14)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U} = \delta_f(t)$$

其中

$$a_{11} = -\frac{C_f + C_r}{u_c m}, \quad a_{12} = -u_c - \frac{aC_f - bC_r}{u_c m}$$

$$a_{21} = -\frac{aC_f - bC_r}{u_c I}, \quad a_{22} = -\frac{a^2 C_f + b^2 C_r}{u_c I}$$

$$b_1 = \frac{C_f}{m}, \quad b_2 = \frac{aC_f}{I}$$

表 4.1 奇瑞瑞虎车辆动力学模型参数表

整车参数	数值	整车参数	数值
整车质量/kg	2325	车轮轮距d/m	1.5
转动惯量 $I / \text{kg} \cdot \text{m}^2$	4132	车体质心高度 h_g / m	0.5
轴距/m	3.025	前轮总侧偏刚度 $G / \text{N} \cdot \text{rad}^{-1}$	80000
质心至前轴距离 a/m	1.430	后轮总侧偏刚度 $G / \text{N} \cdot \text{rad}^{-1}$	96000
质心至前后轴距离 b/m	1.595		

我们假设车辆以 10m/s 的速度匀速运动 ($u_c=10\text{m/s}$), 并参考奇瑞瑞虎车的模型参数 (见表 4.1), 可以得到车辆的运动方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7.5699 & -8.3346 \\ 0.9371 & -9.8698 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 34.4086 \\ 27.6864 \end{bmatrix} \delta_f(t) \quad (4.15)$$

假设车辆以一种稳定的转弯状态行驶, 该状态车辆的前进速度和前轮转向角均恒定。根据状态方程(4.14), 得到横向速度, 横摆角速度的阶跃响应曲线如图 4.2。

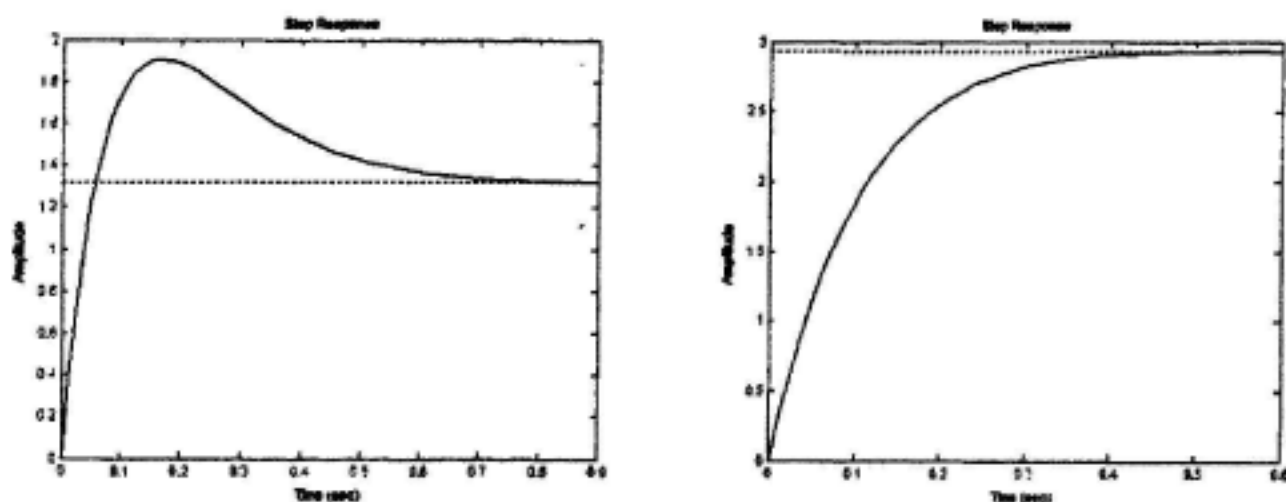


图 4.2 横向速度，横摆角速度的阶跃响应曲线

4.1.2 求解问题的状态空间描述

在上一节建立的运动方程中，两个状态变量分别是横摆角速度和横向速度。本章设计横向控制器，目的是减小相对于期望轨迹的位置与方向误差。因此我们需要基于上一节的运动方程建立关于轨迹误差的数学模型。在状态方程(4.14)我们添加两个状态量， e_1 ， e_2 ，分别表示车辆质心位置到期望轨迹线的距离误差和车辆相对于轨迹线的方向误差。

考虑车辆在半径为常数 R 的车道上以恒定的纵向车速 u_c 行驶，并假设半径 R 很大，使得上一节的小角度假设成立，定义车辆理论的方向变化率为：

$$\dot{\theta}_{des} = \frac{u_c}{R} \quad (4.16)$$

车辆的方向误差定义为：

$$e_2 = \theta - \theta_{des} \quad (4.17)$$

定义：

$$\dot{e}_2 = \dot{\theta} - \dot{\theta}_{des} \quad (4.18)$$

将式(4.17)、(4.18)代入式(4.12)、(4.13)，可得

$$\begin{aligned} m\ddot{e}_1 = & \dot{e}_1 \left[-\frac{C_f}{u_c} - \frac{C_r}{u_c} \right] + e_2 [C_f + C_r] + \dot{e}_2 \left[-\frac{C_f l_f}{u_c} + \frac{C_r l_r}{u_c} \right] \\ & + \dot{\psi}_{des} \left[-\frac{C_f l_f}{u_c} + \frac{C_r l_r}{u_c} \right] + C_f \delta \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned}
 I_z \ddot{e}_2 = & C_f l_f \delta + \dot{e}_1 \left[-\frac{C_f l_f}{u_c} + \frac{C_r l_r}{u_c} \right] + e_2 [C_f l_f - C_r l_r] \\
 & + \dot{e}_2 \left[-\frac{C_f l_f^2}{u_c} - \frac{C_r l_r^2}{u_c} \right] - I_z \ddot{\psi}_{des} + \dot{\psi}_{des} \left[-\frac{C_f l_f^2}{u_c} - \frac{C_r l_r^2}{u_c} \right]
 \end{aligned} \quad (4.20)$$

由此可得，跟踪误差变量的状态方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \ddot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \ddot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -7.5699 & 75.699 & 1.6654 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.9371 & -9.371 & -9.8698 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \\ e_2 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 34.4086 \\ 0 \\ 27.6864 \end{bmatrix} \delta_f(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -8.3346 \\ 0 \\ -9.8698 \end{bmatrix} \dot{\theta}_{des}(t) \quad (4.21)$$

4.1.3 相对道路的车辆运动学模型

上一节讨论的动力学模型是基于车辆坐标系下，相对于道路是独立的，因为道路轨迹跟踪控制需要控制的是相对于道路的位置误差，需要建立以道路为基础的车辆运动学模型。如图 4.3 所示，车辆质心和期望轨迹线之间的横向距离为 e_1 ，因此可以得到地面坐标系下车辆位置为：

$$X = X_{des} - e_1 \sin(\theta) \quad (4.22)$$

$$Y = Y_{des} + e_1 \cos(\theta) \quad (4.23)$$

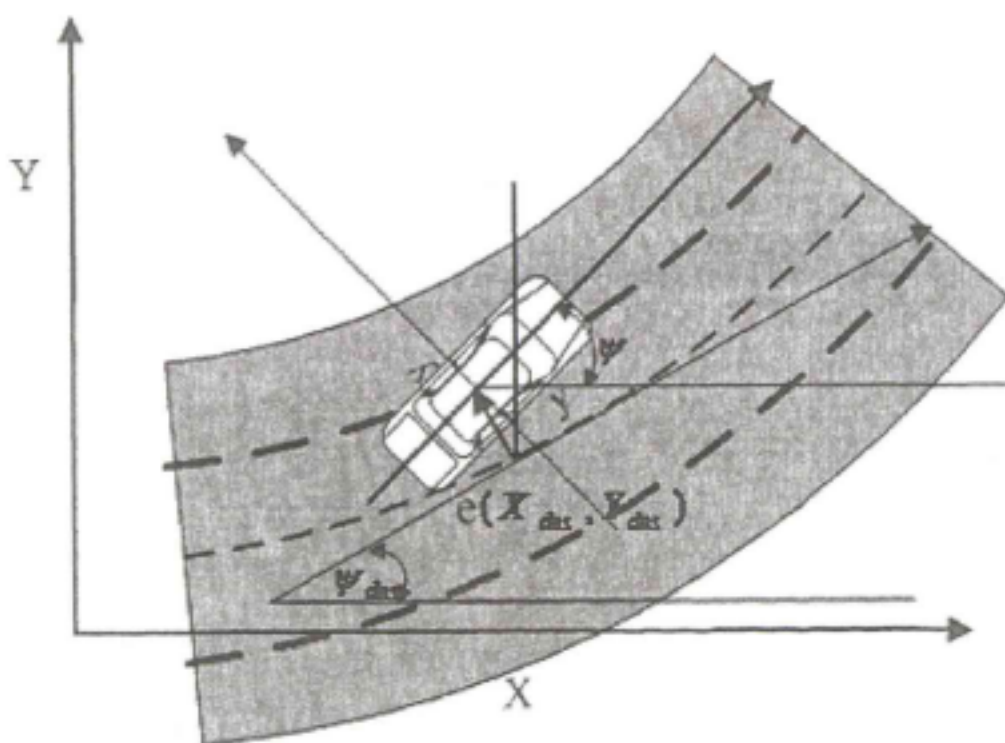


图 4.3 以道路为基础的车辆运动学分析

式中 (X_{des}, Y_{des}) 表示车辆横轴所在的直线与期望轨迹线交点的地面坐标，且有：

$$X_{des} = \int_0^t V \cos(\theta_{des}) dt \quad (4.24)$$

$$Y_{des} = \int_0^t V \sin(\theta_{des}) dt \quad (4.25)$$

分别代入式(4.22)和式(4.23)，可得到车辆的地面坐标为：

$$X = \int_0^t V \cos(\theta_{des}) dt - e_1 \sin(e_2 + \theta_{des}) \quad (4.26)$$

$$Y = \int_0^t V \sin(\theta_{des}) dt + e_1 \cos(e_2 + \theta_{des}) \quad (4.27)$$

4.2 车辆横向控制系统分析

4.2.1 状态反馈控制设计

在上一节式(4.21)所得到的车辆模型状态方程可表示为：

$$\dot{x} = Ax + B_1 \delta + B_2 \dot{\theta}_{des} \quad (4.28)$$

其中

$$x = \{e_1, \dot{e}_1, e_2, \dot{e}_2\}^T$$

求解矩阵 A 的特征值得：

$$p = \{0, -8.7198 + 2.5471i, -8.7198 - 2.5471i, 0\}^T \quad (4.29)$$

可以看出，矩阵 A 在初始时有两个不稳定的特征值，系统需要通过状态反馈环节使系统稳定。因此取：

$$\delta = -Kx = -k_1 e_1 - k_2 \dot{e}_1 - k_3 e_2 - k_4 \dot{e}_2 \quad (4.30)$$

加入状态反馈后系统的状态方程变为：

$$\dot{x} = (A - B_1 K)x + B_2 \dot{\theta}_{des} \quad (4.31)$$

闭环矩阵 $(A - B_1 K)$ 可以通过调节 K 的取值，使特征值位于特定的理想位置。

4.2.2 输出反馈

一般驾驶员的开车行为都是符合预瞄跟随模式的,根据预瞄跟随理论,车辆相对于路面的横向误差通常以车辆前方的某一位置的预瞄点为基准,如图 4.4 所示。即指定给定轨迹中的一点,通过计算该点和车辆的相对位置,并根据车辆当前速度,确定方向盘转角信号,使车辆向该点移动。在这一过程中,考虑采用以车辆为坐标原点的局部坐标系,将 GPS 坐标称为全局坐标系,控制系统采用频率为 10Hz。

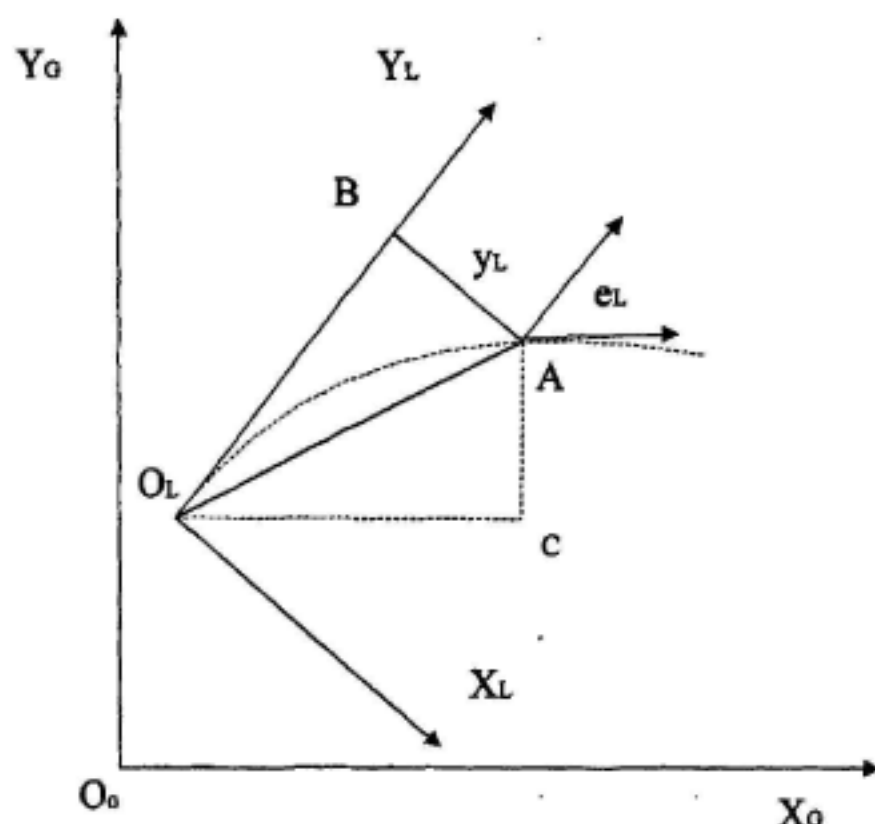


图 4.4 车辆横向运动过程中的坐标系

车辆横向运动过程中的坐标系如图 4.35 所示,其中 $X_G O_G Y_G$ 为全局坐标系, $X_L O_L Y_L$ 为局部坐标系,设 $O_L A$ 为给定轨迹,其中 A 点为预瞄点,AB 垂直于 $O_L B$, $O_L B$ 为预瞄距离, y_l 为横向位置偏差, e_l 为航向角偏差。

通过 GPS 信号可以获得 $O_L B$ 相对于正北的夹角 ang_n , 以及 O_L , A 的经纬度 $(long_O_L, lat_O_L), (long_A, lat_A)$ 。坐标转换过程中有以下关系

$$\angle BO_L C = \frac{\pi}{2} - ang_n \quad (4.32)$$

$$\angle AO_L C = \arctan \frac{AC}{O_L C} \quad (4.33)$$

$$\Rightarrow \angle AO_L B = \frac{\pi}{2} - ang_n - \arctan \frac{AC}{O_L C} \quad (4.34)$$

根据经纬度计算距离公式：

$$O_L A = 111.12 \cos\{1/[\sin lat_O_L \sin lat_A +$$
(4.35)

$$\cos lat_O_L \cos lat_A \cos(long_A - long_O_L)]\}$$

$$y_l = O_L A \sin(\angle A O_L B)$$
(4.36)

当车辆与道路偏差较小时，可以认为方向角误差很小，弦长可以近似等于弧长，那么系统的输出可以表示为：

$$y = e_1 + d_s e_2$$
(4.37)

式中， d_s 为预瞄距离。

4.2.3 PID 控制闭环系统

图 4.5 所示为闭环系统的结构图，其中 $P(s)$ 表示车辆转向角输入和系统输出 y 之间的传递函数， $C(s)$ 表示用于控制器的传递函数，将在之后的章节讨论。由路面决定的理论横摆角速度通过传递函数 $G(s)$ 来影响系统动力学。信号 $n(t)$ 为影响系统的传感器噪声。

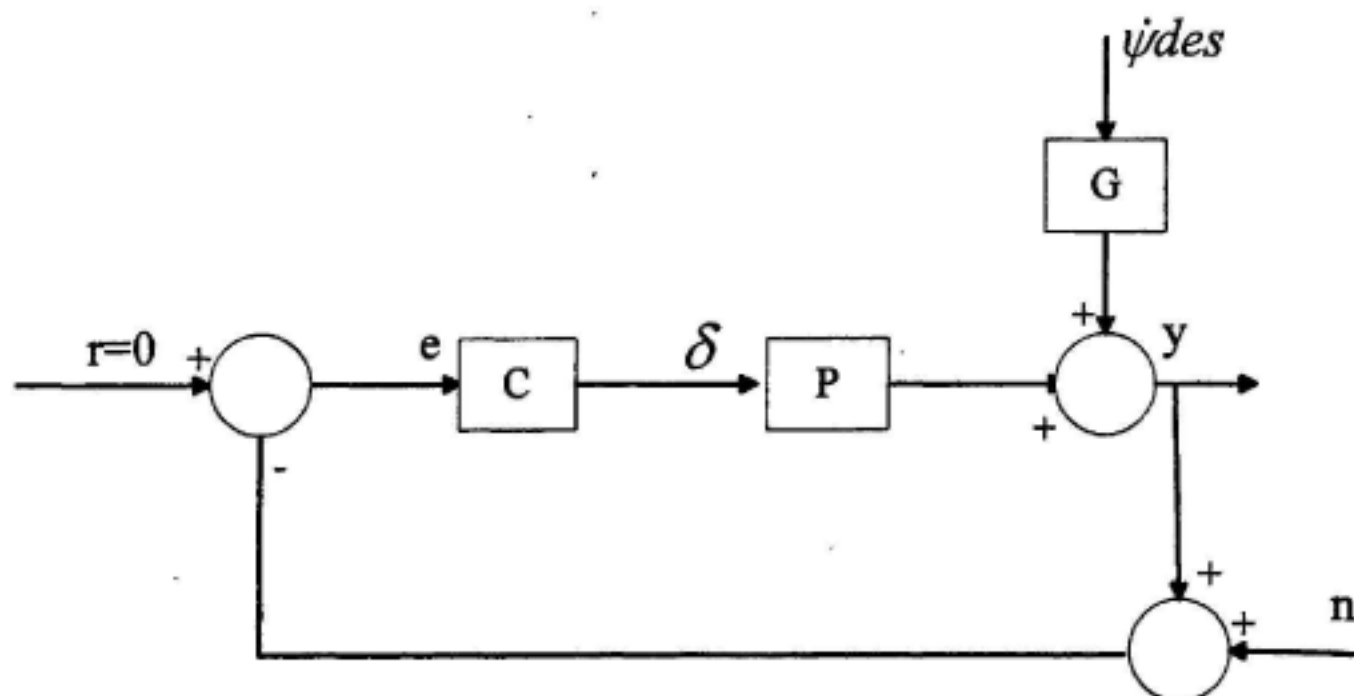


图 4.5 闭环系统结构图

由状态方程(4.31)可知， $P(s)$ 的状态空间转移矩阵为：

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \ddot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \ddot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -7.5699 & 75.699 & 1.6654 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.9371 & -9.371 & -9.8698 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \\ e_2 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 34.4086 \\ 0 \\ 27.6864 \end{bmatrix} \delta_f(t) \quad (4.38)$$

考虑上一节定义的系统输出为：

$$y = e_1 + d_s e_2 \quad (4.39)$$

将闭环系统输出表示为：

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U} \quad (4.40)$$

式中

$$\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad d_s \quad 0], \mathbf{D} = 0$$

若取 $d_s=10$ ，转换为车辆前轮转角到位置误差输出的传递函数，有：

$$\begin{aligned} G(s) &= \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} \\ &= \frac{311.3s^2 + 2804s + 2418}{s^4 + 17.44s^3 + 82.52s^2} \end{aligned} \quad (4.41)$$

我们把上文推导出的车辆转向控制系统的传递函数写成：

$$G(s) = \frac{1}{s^2} \frac{311.3s^2 + 2804s + 2418}{s^2 + 17.44s + 82.52} = \frac{1}{s^2} G_1(s) \quad (4.42)$$

开环传递函数 $G(s)$ 在原点有双重极点。如果用一个比例控制器控制反馈回路，则 $C(s)=K$ ， K 为控制器增益。

根据系统根轨迹（图 4.6）可以看出，当使用适当大的增益时，带比例控制的闭环系统是稳定的，在较小的增益下是不稳定的。但通过分析系统的频域特性，绘制 Bode 图看出，随着比例增益增大，虽然闭环系统变得稳定，但它的相位裕度很小。在图 4.7 中，比例增益为 1 时，得到的相位裕度为 18 度，并且此时是系统所能获得的接近最好的相位裕度。此时的阶跃响应曲线如图 4.8。

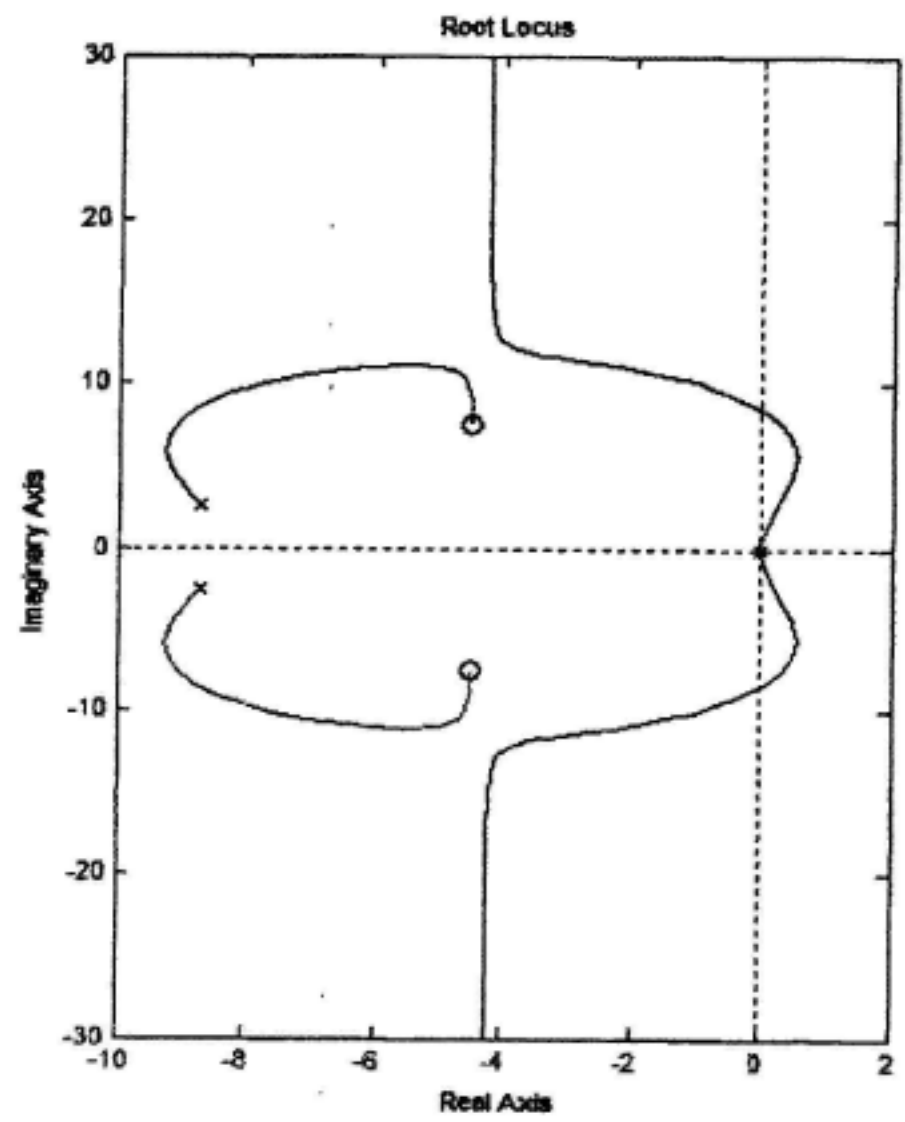


图 4.6 控制系统根轨迹

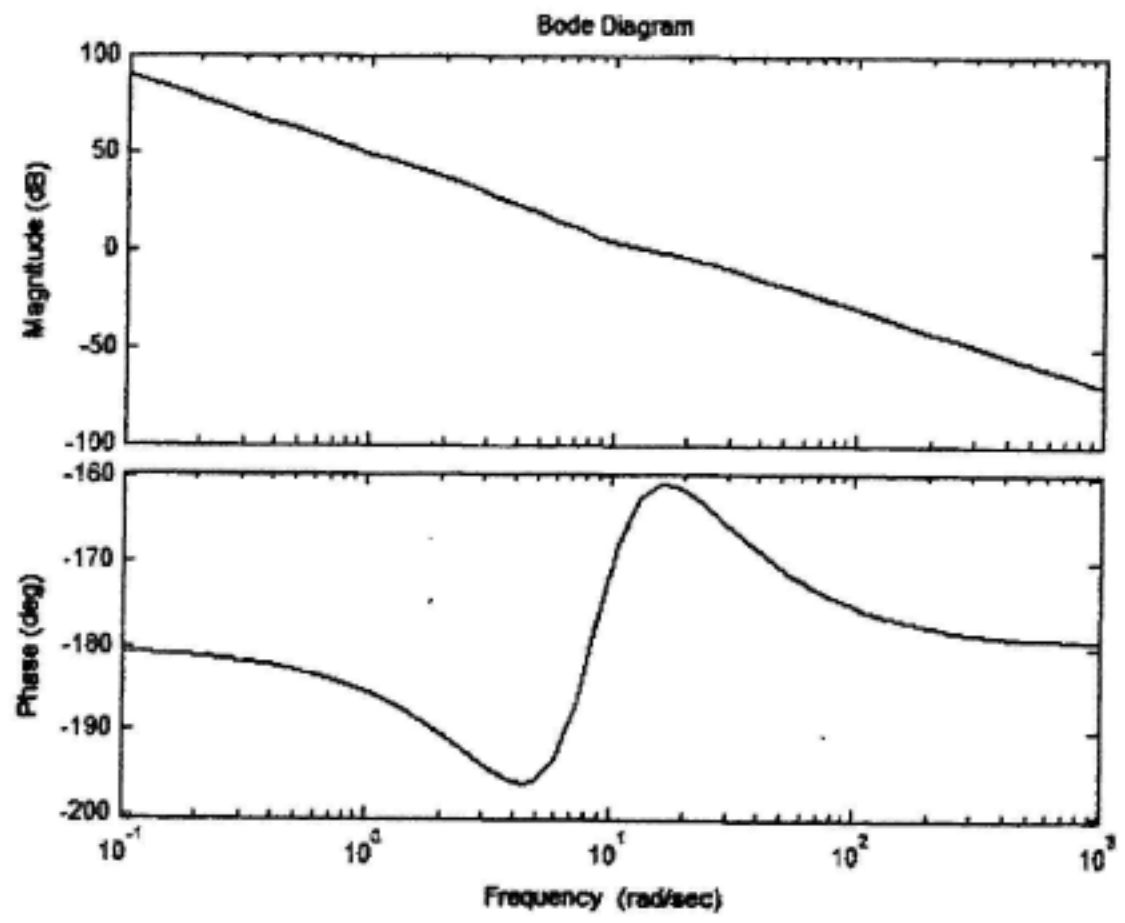


图 4.7 控制系统频域特性

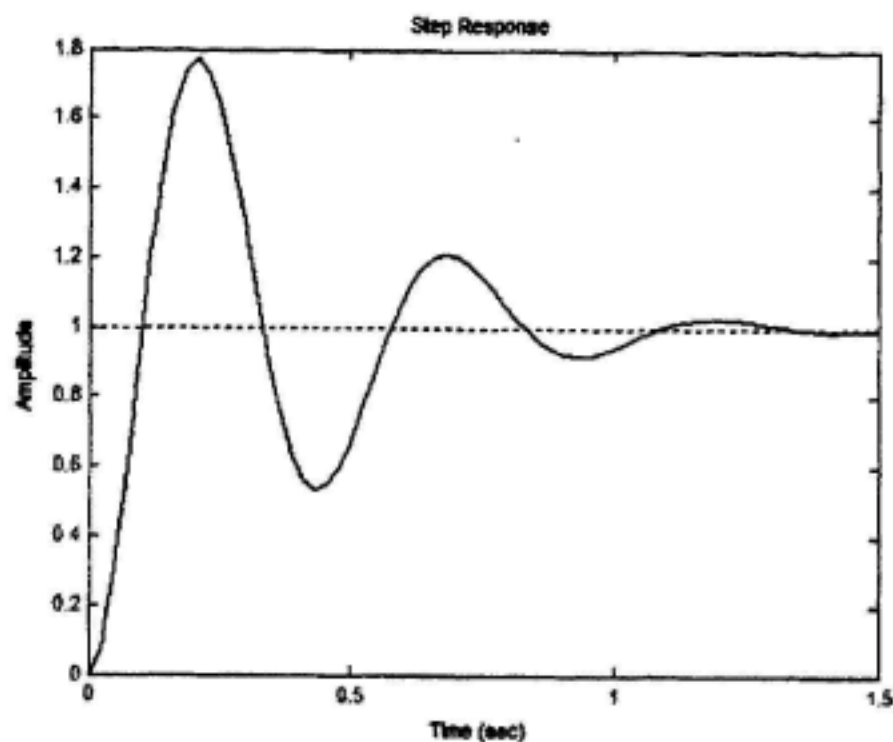


图 4.8 单位阶跃响应曲线

如图 4.8 可见系统的超调量很大, 动态性能较差, 要满足设计要求, 考虑进一步设计 PID 控制器:

$$C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (4.43)$$

我们取 $K_p=1$, $K_I=0.5$, $K_D=0.25$, 对系统进行仿真, 得到阶跃响应曲线, 如图 4.9。由图可以看出, 通过串联 PID 控制器, 系统性能得到了很大的改善。

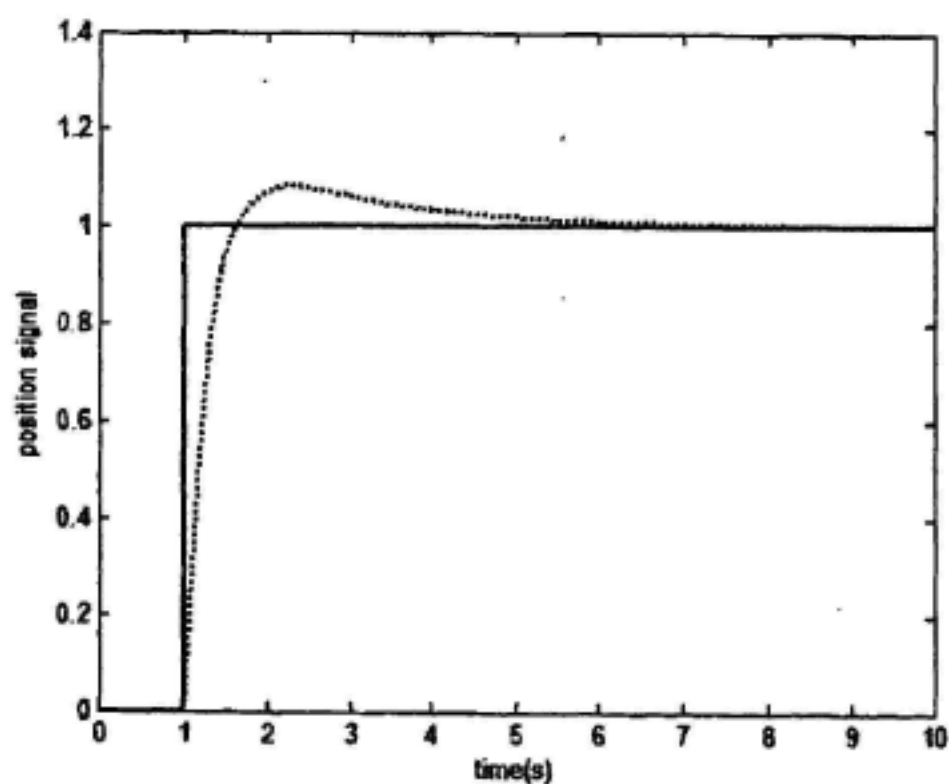


图 4.9 PID 控制单位阶跃响应曲线

4.3 基于小脑模型神经网络与 PID 复合的自适应控制器设计

上一节关于无人驾驶车辆控制系统的讨论都是基于车辆匀速行驶并且是在小的转向情况，适用于在道路通畅，并且无较大转弯的情况，如高速公路。考虑到城市交通环境复杂，需要经常更改路径，频繁地变换速度，此时上述关于车辆动力学的假设将不再成立，实际的情况会存在以下各种不确定因素：

- 系统模型参数的变化；
- 未建模的动力学；
- 未建模的系统时延；
- 平衡点的变化；
- 传感器噪声以及传感器时延；
- 不可预测的干扰输入

所以我们在模型不太精确或存在其他变化因素的条件下，系统仍然能够保持预期的性能。对于具有时延和参数时变的控制系统，PID 参数只有不断地根据对象参数的变化进行适应性的自整定或调整，才能得到最优的控制效果。因此我们考虑设计一种小脑模型神经网络与 PID 复合的控制器，使控制器具有自学习能力，能够自动补偿被控模型和输入信号发生的非预知的变化。

4.3.1 CMAC 的结构与原理

小脑模型神经网络，英文全称为 Cerebellar Model Articulation Controller，简称 CMAC，它是查表型自适应神经网络，它可以准确地描述出非线性函数的特征，同时，具有学习功能，可依据学习结果改变表格内容，对信息可区分存储。人类的小脑主要是对运动产生作用。在人类神经学的研究中，它由含有一些神经元覆盖组成。在这项研究的基础上，Albus J.S.(1975)提出了 CMAC，它具有人类小脑一般学习的功能，在多维空间中进行映射，解决了输入端到输出端非线性问题。CMAC 是一种局部逼近神经网络，它具有联想记忆的功能，它的每一个神经元的输入输出是一种线性关系，但总体上是一种表达非线性映射的表格系统。常用于模式识别、人工智能、信号处理、机器人控制以及自适应控制等研究领域。CMAC 与其他神经网络相比，优点在于(Albus J.S.1991):

- 1) 它是局部逼近神经网络，它只对输入空间的小部分范围进行训练，只有相应小部分的几个权值调节神经网络的输出，因此对于每次的输入输出数据需要调整的权值很少，学习速度比全局神经网络要快，更能符合实时控制的要求；
- 2) 它具有较强的输入和输出的映射能力，并且可以根据不同的精度要求来

逼近任意类型函数。

- 3) 它具有一定的泛化能力, 对具有同一规律的学习集以外的数据, 经过训练, 网络也能给出合适的输出。
- 4) 其查表寻址方式, 易于计算机编程实现, 网络形式简单, 在线计算速度快。

CMAC 把控制器的每个输入状态作为一个状态向量, 组成一个输入空间。把网络训练的权值存入存储器, 并根据期望输出与实际输出地误差来调整这些权值。它实际上是一种复杂的查表系统, 主要用于表达非线性的映射。CMAC 的模型结构如图 4.10 所示, 它有两层映射关系, 表达系统输入与输出的非线性关系, 其具体做法是将输入状态空间量化为离散的点, 每个离散点对应于一个实际存储器单元并作为一个神经元, 每个离散点经训练调整过后权值分布存储在相邻几个存储器位置上。

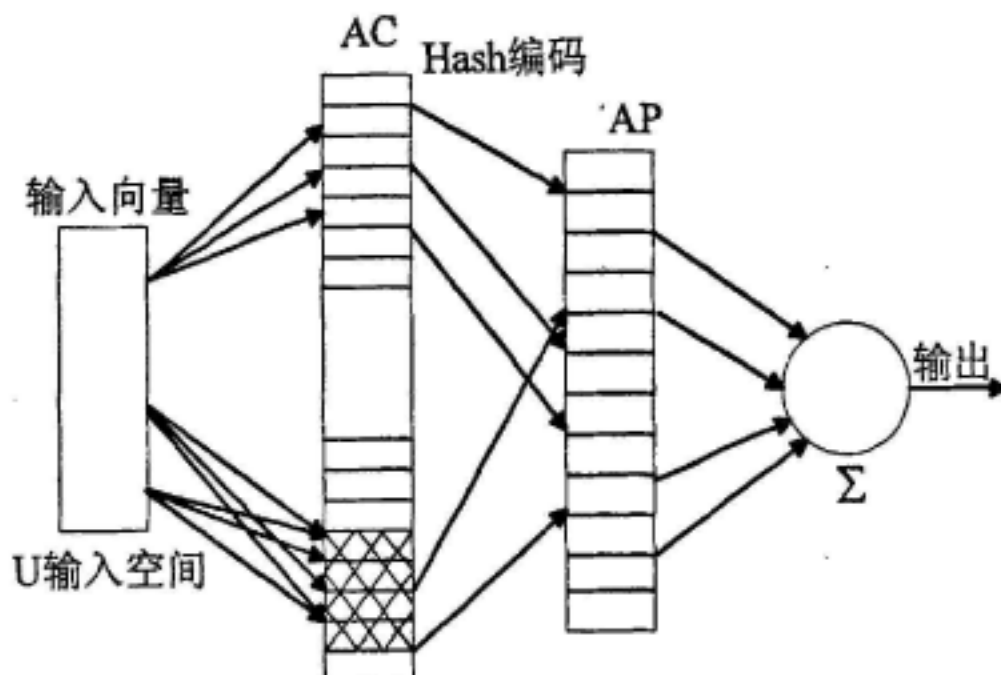


图 4.10 CMAC 结构示意图

CMAC 的工作原理如下

(1) 概念映射(U→AC)

概念映射(Conceptual Mapping)是一种输入空间 U 内的映射, 映射至虚拟的存储器 AC (Serrano F.J., et al., 1998)。

假定输入的数值向量为 u , 维度为 n , 则有:

$$u_p = [u_{1p}, u_{2p}, \dots, u_{np}]^T \quad (4.44)$$

对输入量进行量化, 表示为 $[u_p]$, 每一个量化的输入状态点激活存储器中的对应 c 个单元, c 也称为 CMAC 网络的感知器个数。映射后的输出向量可以用下式表示:

$$R_p = S_1([u_p]) = [s_1([u_p]), s_2([u_p]), \dots, s_c([u_p])]^T \quad (4.45)$$

式中,

$$s_j(u_p) = 1 \quad j=1,2,\dots,c$$

输入空间中的临近两点通过映射作用激励存储器 AC 中部分重合的单元, 这两点的距离越近, 重合的部分越多, 相距较远的点在 AC 中不会产生重合, 这样就实现了网络的局域泛化。

(2) 实际映射 (AC->AP)

实际映射 (Practical mapping) 是指利用哈希编码 (Hash Coding) 技术, 表示概念存储器 AC 的 c 个存储地址与实际存储器 AP 相应的 c 个存储地址的映射关系, 在 c 个存储地址中存储网络训练的权值, 网络输出是实际存储器 AP 中存储的对应 c 个值的累加结果。

若只考虑单输出的情况, 有:

$$y_p = \sum_{j=1}^c w_j s_j([u_p]) = R_p^T W_p \quad (4.46)$$

式中,

$$W_p = [w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_c]^T$$

将式(4.45)带入式(4.46), 则有:

$$y_p = \sum_{j=1}^c w_j \quad (4.47)$$

上文提到的哈希编码也称哈希存储, 是一种常用的计算机数据存储算法, 利用哈希表存储数据, 以实现数据的压缩存储(严蔚敏, 等, 1996)。在 CMAC 神经网络中, 当输入矢量维数为 n , 并且每个矢量的量化为 q 个离散点, 若 n, q 较大, 存储器 AC 需要的空间将会很大。实际应用时, 网络训练只需要局部的调整网络输出层的权值, 即在存储器 AC 中被激励的单元(非零单元)是相对稀少的, 利用哈希存储方法, 可以将 AC 空间进行压缩, 压缩后数据存储到存储器 AP 中, 哈希存储有多种方法, 其中除留余数法是较为容易实现的一种。

除留余数法是取地址数值被某个不大于哈希表长 m 的质数 p 除后, 用所得的余数作为散列地址(徐士良, 2005)。对于 CMAC 来说是将输入矢量在存储器 AC 中的存储地址除以一个质数, 取余数作为在存储器 AP 中的地址。

4.3.2 CMAC 的学习算法

考虑单输出系统, 给定输入/输出样本对, 采用有导师的学习算法, 取导师信号为 u_d/d_p , $p=1, 2, \dots, L$ 。跟据 δ 学习规则修正网络权值:

$$\Delta w_j(t) = \eta \frac{(d_p - y_p(t))s_j([u_p])}{\|R_p\|^2} \quad (4.48)$$

由式(4.45)和式(4.46)可知

$$\|R_p\|^2 = \sum_{j=1}^c s_j^2(u_p) = c \quad (4.49)$$

代入式(4.48)可得

$$\Delta w_j(t) = \eta \frac{(d_p - y_p(t))}{c} = \eta \frac{e_p(t)}{c} \quad (4.50)$$

为了在 CMAC 中产生一个非线性映射函数, 步骤如下:

(1) 若要求 CMAC 产生的目标非线性函数为 f^* , 那么对输入矢量 u , $y^*=f^*(u)$ 就是输出矢量的期望值。

(2) 在输入矢量中取一个点 u , 计算该点的函数值 $y=f(u)$ 。

(3) 对应 $y^*=(y1^*, y2^*, \dots, yn^*)$ 和 $y=(y1, y2, \dots, yn)$ 中每两点, 如果 $|y_i^* - y_i|$ 符合误差允许的要求, 就停止训练, 函数的各参数存储至存储器中; 如果 $|y_i^* - y_i| < e_i$, 那么对网络对应的权值 w 增加 Δw , Δw 的计算按式(4.50)。

(4) 重复以上步骤, 直至各输入矢量计算的误差都小于允许的范围。

4.3.3 CMAC 与 PID 的复合控制

正如人类的小脑是用来控制运动的, 小脑模型神经网络(CMAC)最早就被用于机器人运动控制领域, 现已有多样的控制模式, 如反馈控制模式, 直接逆运动控制模式, 前馈控制模式等(King - Lung Huang, et al., 1997; Chiang&Lin, 1996), 本文采用 CMAC 的前馈控制方式, 通过 CMAC 和 PID 的复合结构实现系统控制。

CMAC 与 PID 复合控制结构框图如图 4.11 所示。在该控制结构中, CMAC 控制环节通过网络训练实现对非线性被控对象模型的逼近。PID 反馈控制环节实现控制的准确性并保证系统的稳定性和鲁棒性。可见该控制结构是前馈反馈控制。假设离散形式下, 被控对象的状态描述为:

$$x(k+1) = g[x(k), u(k)] \quad (4.51)$$

式中, x 为系统状态向量; u 为控制向量; $g[\cdot]$ 为非线性特性函数。

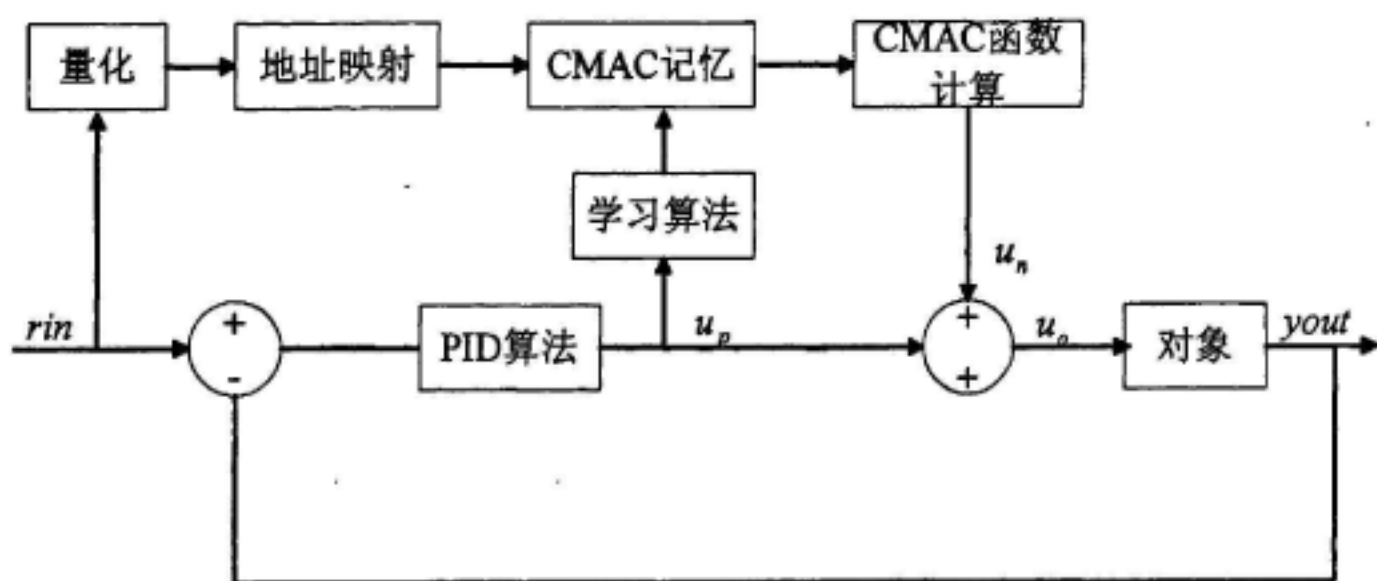


图 4.11 CMAC 与 PID 复合控制结构框图

对于该系统，CMAC 控制环节是通过学习训练被控对象的动态特性，获得系统控制输入量 u 与状态 x 的关系：

$$u(k) = g^{-1}[x(k), x(k+1)] \quad (4.52)$$

该系统通过 CMAC 和 PID 的复合控制实现系统闭环控制，PID 作为反馈环节，能够确保控制的准确性和平稳性，且能够减少干扰影响。CMAC 环节作为前馈，能够逼近车辆横向运动的逆动态模型，减少控制的稳态误差，减小系统超调和响应时间。

(1) 控制周期

系统给定下一控制周期的期望状态为 $X_d(k) = X_i(k+1)$ ，由 CMAC 控制器部分产生的控制量 $u_n(k)$ ，由 PID 部分产生的控制量为 $u_c(k)$ ，被控对象的控制量总的输入为：

$$u(k) = u_n(k) + u_c(k) \quad (4.53)$$

(2) 学习周期

系统产生的实际状态 $x(k)$ 作为 CMAC 网络下一时刻的输入，由 CMAC 产生的控制量为 $u_n(k)$ 。取 $u(k)$ 为导师信号，按 δ 学习规则修正存储器 AP 中的权值，算法表示为：

$$\Delta W(k) = \eta[u(k) - u_n(k)]/c \quad (4.54)$$

式中， η 为网络设定的学习速率。

取控制系统的初始值为 $W(0)=0$ ，此时 $u_n(0)=0$ ， $u(0)=u_c(0)$ 。仅 PID 控制作用于系统，随网络对误差及误差变化的学习训练，经由 CMAC 产生的控制量 u_n 将逼近系统跟踪的理想输入 u ，其中 u_n 可以表示如下：

$$u_n(k) = N\phi[x(k), x_d(k); W(k)] \quad (4.55)$$

与式(4.55)比较可知, $N\phi[\cdot] = g^{-1}$, 这里用 $x_d = x_i(k+1)$ 代替了 $x(k+1)$ 。

(3) 复合控制算法

根据上文所述 CMAC 的训练方法, 在每一步的控制中, 根据这一周期 CMAC 存储单元中的权值得到对应的 CMAC 控制量 $u_n(k)$, 根据系统输入与输出之间的误差和设定的学习速率修正相应的权值。

CMAC 权值的调整算法为:

$$E(k) = \frac{1}{2} (u(k) - u_n(k))^2 \cdot \frac{a_1}{c} \quad (4.58)$$

$$\Delta w(k) = \eta \frac{u(k) - u_n(k)}{c} a_i = \eta \frac{u_p(k)}{c} a_i \quad (4.59)$$

$$w(k) = w(k-1) + \Delta w(k) \quad (4.60)$$

式中, a_i 为二元联想向量, 以数值“1”和“0”表示第 i 个单元是否被激活; c 为 CMAC 的感知器个数; $u_n(k)$ 为系统中 CMAC 环节 k 时刻产生的控制量; η 为学习常数, $\eta \in (0, 1)$ 。

CMAC 控制的输入量为:

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^c w_i a_i \quad (4.56)$$

全系统的输入量为:

$$u(k) = u_n(k) + u_p(k) \quad (4.57)$$

式中, $u_p(k)$ 为 PID 环节产生的控制量。

由以上的描述可知, CMAC 与 PID 的复合控制中, 系统中 PID 控制部分的作用是增强系统的鲁棒性, 而 CMAC 控制部分是增强系统的自适应性。PID 控制单独作用时, PID 各参数的值决定着控制效果, 控制系统工况发生改变就需要对系统参数重新整定, 而采用 PID 与 CMAC 的复合控制后, 控制效果不再局限于 PID 参数的值, 当对象或环境发生变化时, 由于 CMAC 的作用可以使系统的控制性能在一定的范围内自动的调整。

4.3.4 CMAC 与 PID 的复合控制仿真结果

根据前文对车辆横向运动已经建立的模型, 车辆前轮转角到位置误差输出的

传递函数为：

$$G(s) = \frac{311.3s^2 + 2804s + 2418}{s^4 + 17.44s^3 + 82.52s^2}$$

在比较理想的条件下，取 PID 控制参数为 $K_p=1$ ， $K_I=0.5$ ， $K_D=0.25$ 时可以得到良好的控制效果。为了验证在连续变化的较大转向角输入的控制效果，设计了 PID+CMAC 控制器和单纯 PID 控制器对比仿真实验。采用周期为 10ms，采样时间为 10s，取输入信号为正弦信号。

其跟踪结果如图 4.12 和图 4.13 所示，其中图 4.14 分别给出了 CMAC 与 PID 复合控制中的 CMAC 的控制器、PID 控制器和总控制器的输出。由仿真结果可见，控制过程初始时 PID 控制起主要作用，通过对控制过程的学习，CMAC 控制逐渐发挥作用，在 0.4s 的训练时间之后，系统能够准确的跟踪输入信号。引入 CMAC 控制环节后，系统对动态输入的跟踪误差减小，并能稳定的跟踪输入信号。

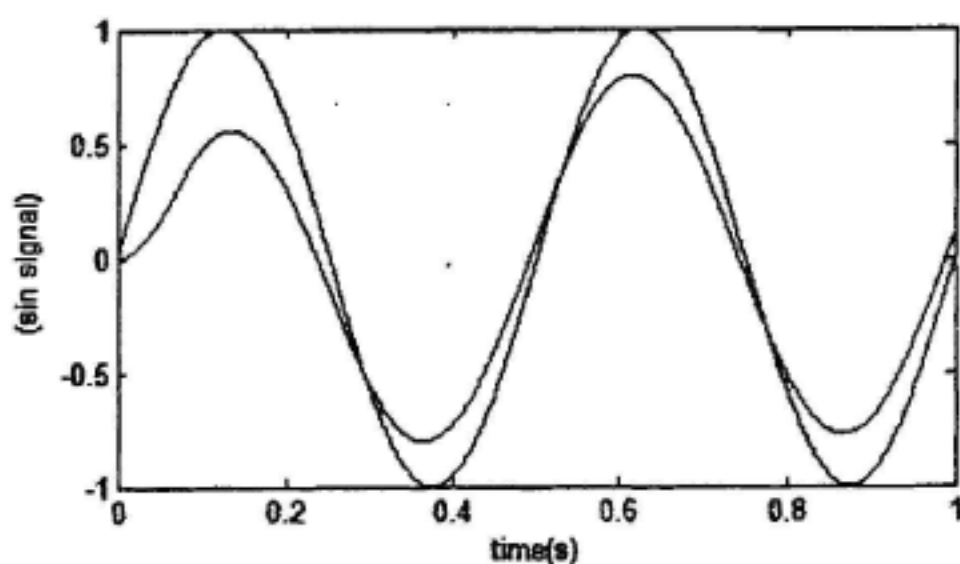


图 4.12 纯 PID 控制正弦信号跟踪曲线

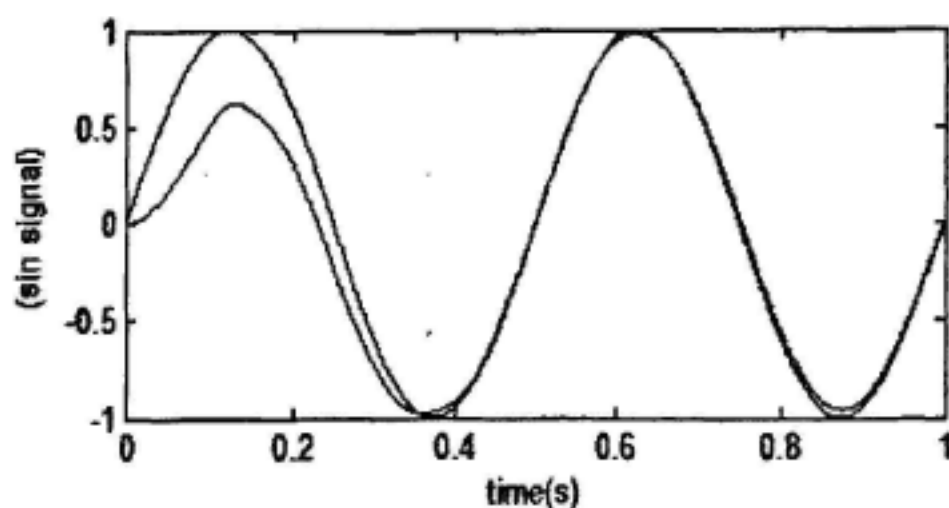


图 4.13 CMAC 与 PID 复合控制正弦信号跟踪曲线

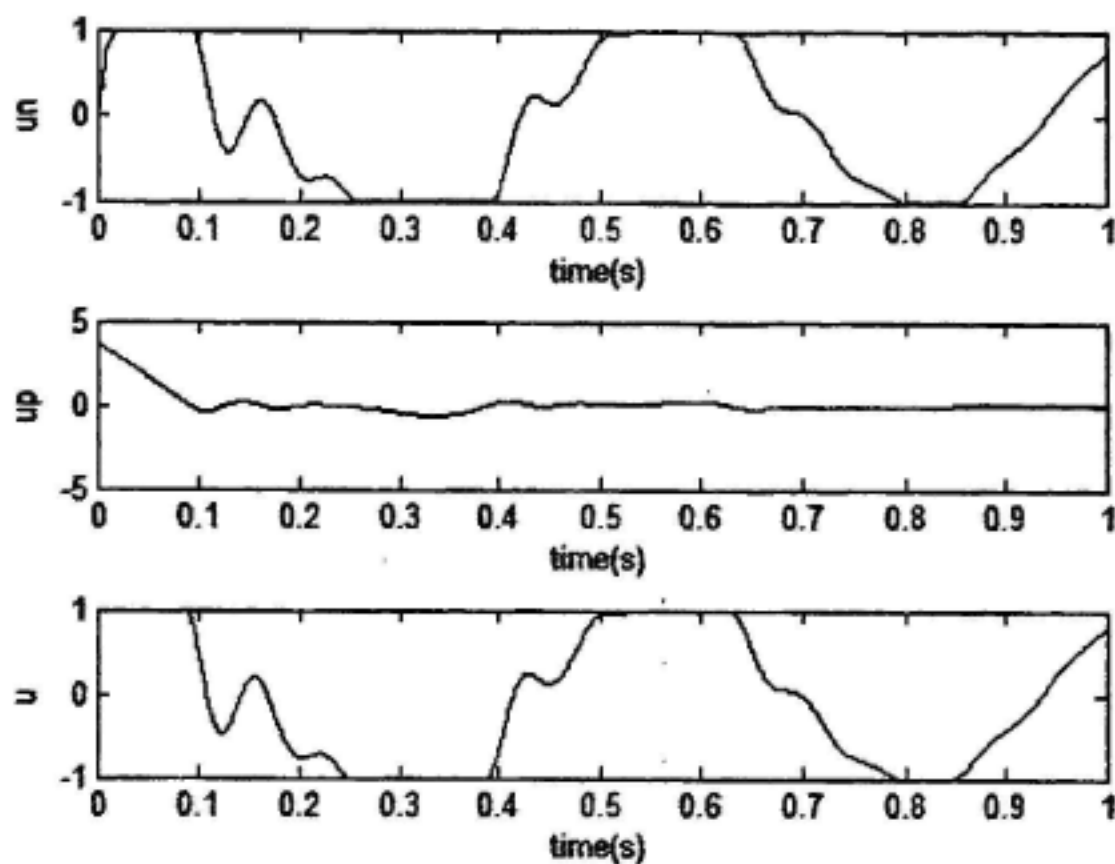


图 4.14 CMAC 和 PID 复合控制各个控制器的输出

为了验证控制系统的抗干扰性，设计了有扰动 Matlab 仿真实验，参数设定为：

采样周期：10ms，仿真时间：10s。

系统干扰输入：在 $t=2s$ 时控制量中都加入 $d=1$ 的一个扰动信号。

仿真曲线见图 4.15 所示，其中图 4.16 显示了阶跃响应时的各个控制器的输出量。

总结以上实验的结果得出，CMAC 控制器的加入使控制性能比单纯的 PID 控制改善了很多。在跟踪方波和阶跃输入时，系统超调量明显减小。在跟踪正弦信号时，提高了系统的跟踪精度，而且在扰动作用时仍然能很好地对正弦指令进行跟踪。此外引入干扰的实验也验证了 CMAC 控制具有较强的抗干扰能力。

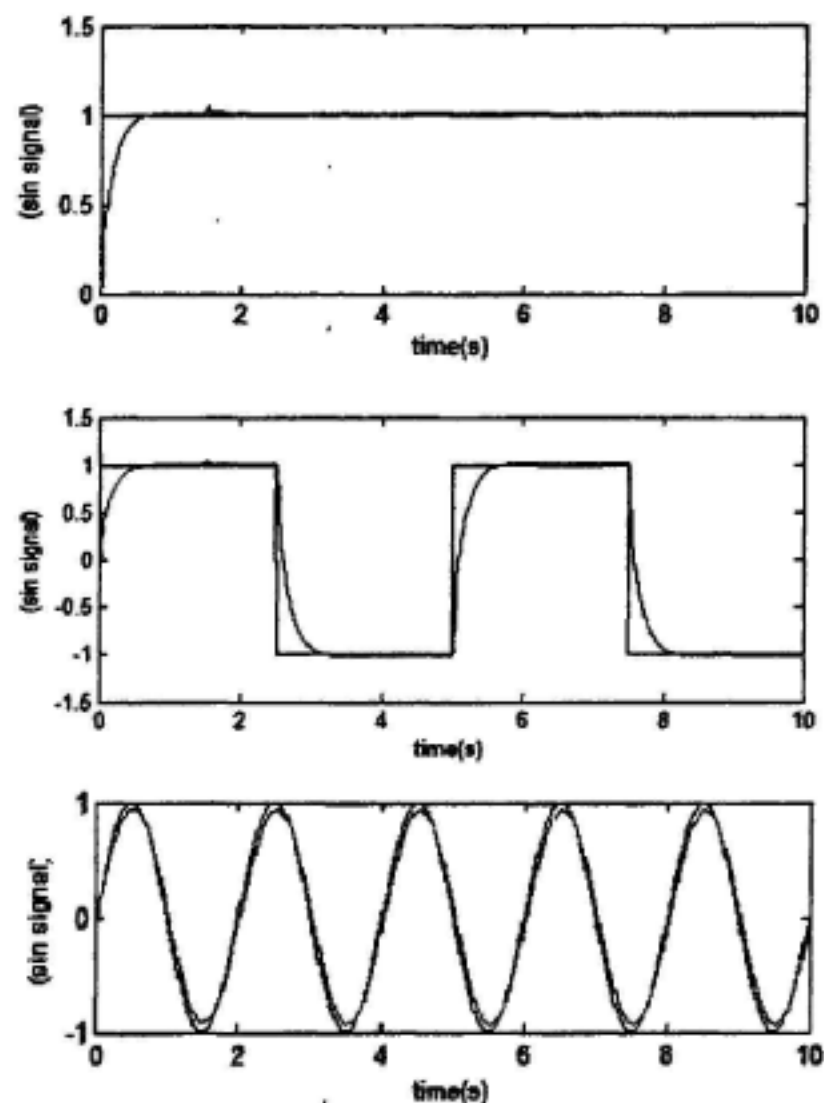


图 4.15 有扰动的不同输入信号仿真实验响应结果

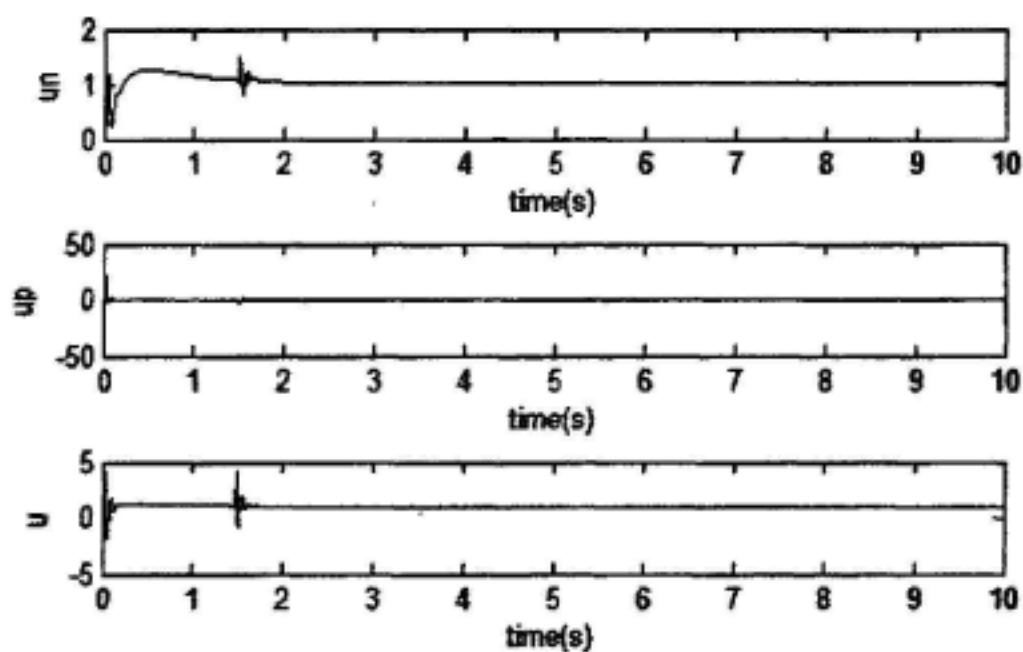


图 4.16 有扰动的仿真实验各个控制器输出

4.3.5 CMAC 与 PID 复合控制的实验验证

为了验证 CMAC 与 PID 复合控制算法的有效性,本文以“智能先锋”无人车为平台进行了相应的实车实验。图 4.17 显示了实验所设定的参考轨迹由一系列 GPS 坐标点表示,它由一小段直道和连续的弯道组成,用来测试车辆的动态特性在非线性变化情况下控制器对路径跟踪的准确性,设计行驶速度为 20km/h。在

实验中，油门和制动踏板是手动控制的，以确保实验的安全。

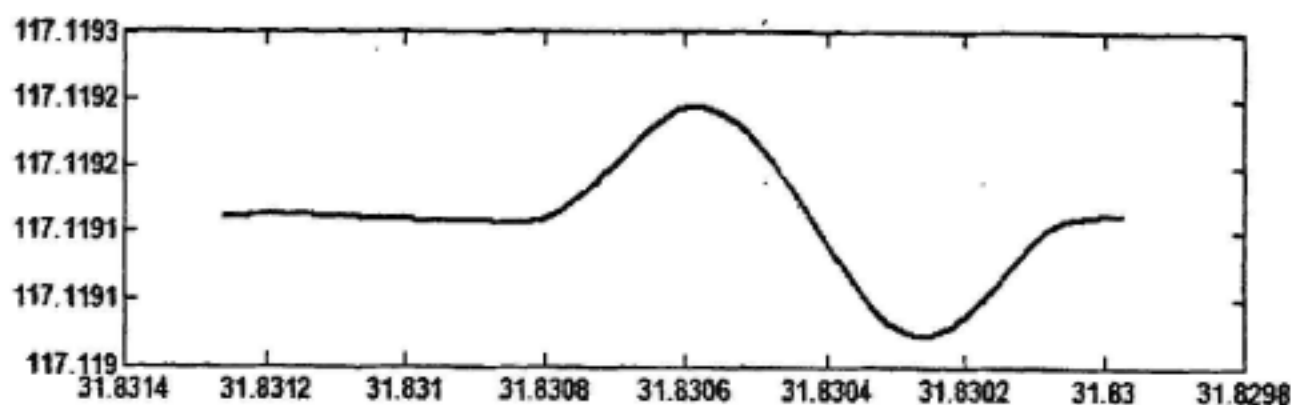


图 4.17 轨迹跟踪实验设定的期望轨迹

实验参数设定为：

PID 控制参数： $K_p=1$ ， $K_f=0.5$ ， $K_D=0.25$

CMAC 的映射：

$$s(k) = (u(k) - u_{\min}) \frac{M}{u_{\max} - u_{\min}}$$

其中， u_{\min} 和 u_{\max} 是输入量的上下界限值， M 为 u_{\max} 的量化值。根据哈希编码方法，有 CMAC 的映射关系表达式：

$$ad(i) = (s(k) + i \text{ MOD } N) + 1$$

其中， $i=1,2,\dots,c$ 。

在实验中，取 $M=100$ ， $N=5$ ，取泛化参数 $c=5$ ， $\eta=1$ ， $\alpha=0.4$ 。

跟踪结果如图 4.18 和图 4.19 所示，其中图 4.18 为单独 PID 控制作用下的轨迹跟踪结果，图 4.19 为 CMAC 与 PID 复合作用的轨迹跟踪结果，由图可见，CMAC 与 PID 复合作用下的车辆轨迹跟踪精度明显优于单独的 PID 控制。图 4.20 分别给出了 CMAC 与 PID 复合控制中的 CMAC 控制器、PID 控制器和总控制的前轮转角的输出。通过实验结果可以看出，通常状况下如车辆行驶在非弯曲道路时，此时横向动力学近似在线性范围，采用一般的 PID 控制方法偏差不大，车辆在预定的轨迹上偏离不多，此时不需要 CMAC 环节的介入。当进入曲线行驶时，CMAC 经过对常规控制器的输出不断学习，逐渐由 CMAC 控制起作用，如预期的那样，它能够自动补偿被控模型的动态变化与常规 PID 控制一起作用达到良好的跟踪能力，在引入 CMAC 控制环节后，系统对动态输入的跟踪误差有所减小，并能稳定的跟踪输入信号。

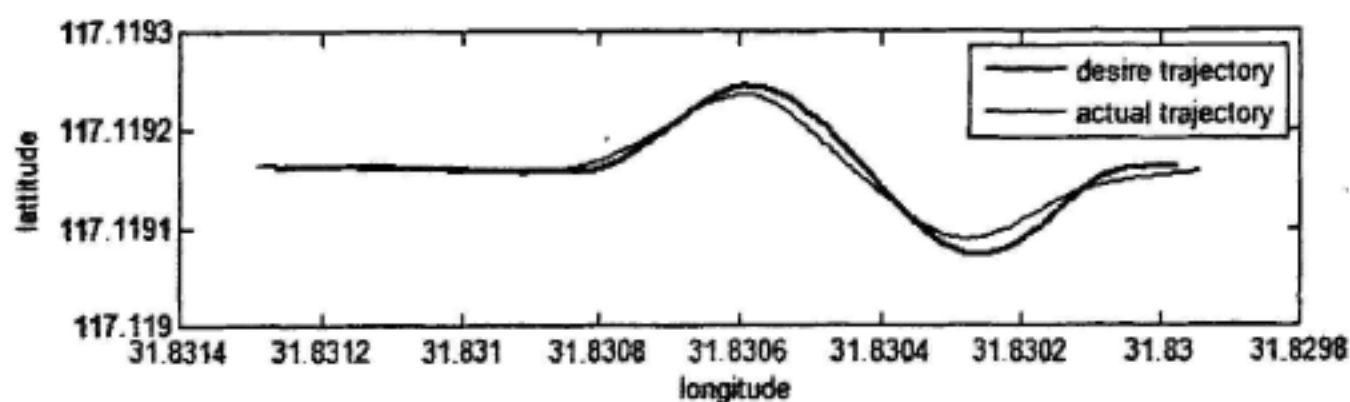


图 4.18 PID 控制作用下轨迹跟踪结果

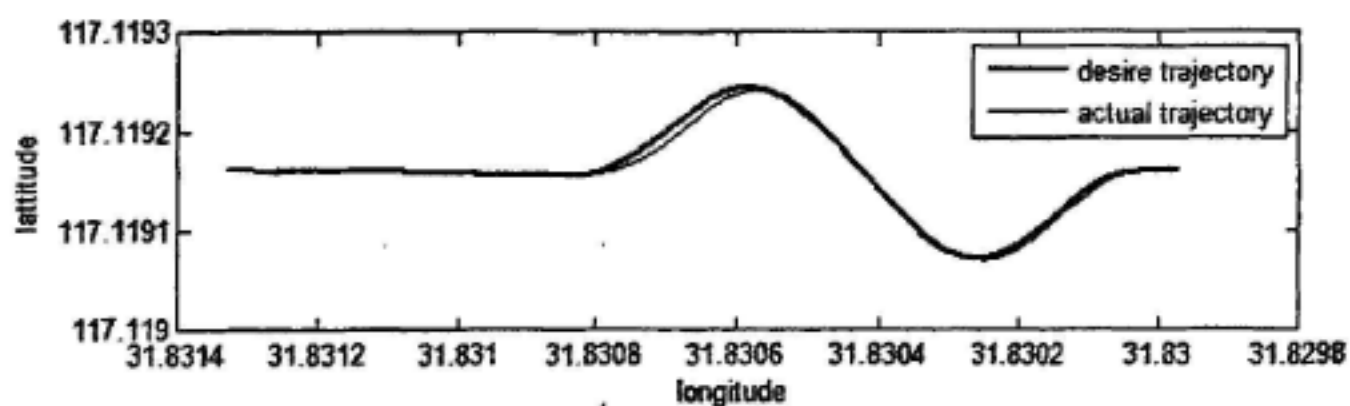


图 4.19 CMAC 与 PID 复合控制作用下轨迹跟踪结果

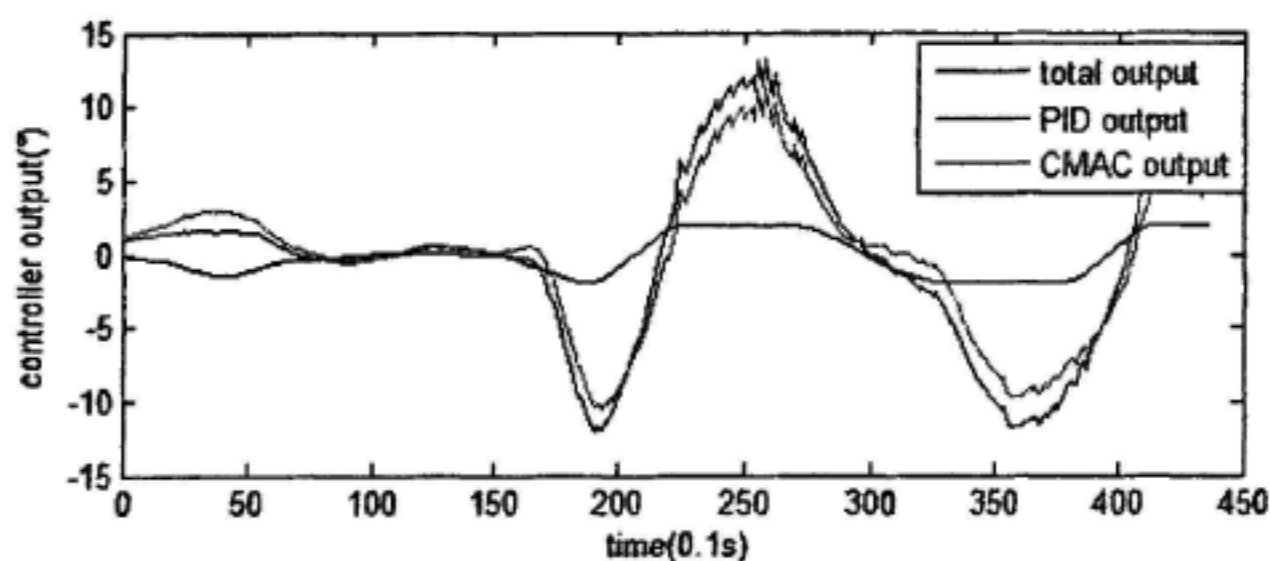


图 4.20 CMAC 控制器、PID 控制器和总控制器的输出

由实验结果可以得出：基于 CMAC 与 PID 的复合控制的无人驾驶车辆横向控制算法不需要有非常精确的数学模型，就能实现准确的轨迹跟踪控制。从以上的实验结果看，在运用 CMAC 方法以后，系统的超调量明显减小，响应时间缩短，同时，动静特性有所改善。这项改进使得无人车在复杂的城市环境和多变的行驶状态中行驶的平顺稳定。该控制器很好地模拟了驾驶员的真实驾驶行为，这种智能控制方法对于城市环境中的无人驾驶车辆的横向控制这一种复杂的控制问题无疑是一种很有效的解决手段。

4.4 本章小结

本章首先将车辆横向动力学化简为最基本的两自由度车辆动力学模型,即仅考虑车辆的横摆及横向运动,随后,在两自由基本动力学模型基础上将无人车辆轨迹跟踪的控制问题描述为状态空间的形式并设计了 PID 控制系统,由 Matlab 仿真实验验证了在匀速小转向情况下, PID 控制器具有较好稳态特性和较高的控制精度,但是在城市道路中驾驶车辆,随时可能会转向、变道或改变速度行驶。为了使无人车在复杂的城市环境下具有更高的自适应性,在“预瞄—跟随”理论模型和经典 PID 控制方法的基础上设计了一种小脑模型神经网络与 PID 复合的横向控制器, CMAC 具有自学习能力,能够自动补偿被控模型和输入信号发生的非预知的变化,本文利用 CMAC 和 PID 的复合控制实现闭环控制,其中, PID 作为反馈环节,维持系统的稳定性和鲁棒性。CMAC 作为前馈环节,实现车辆横向运动的逆动态模型的逼近,减小超调量和响应时间,从而使无人车能够在城市环境中各驾驶任务下实现稳定、准确的道路跟踪行驶。最后对以上控制方法的仿真结果进行简单介绍,实验验证了 CMAC 与 PID 复合控制方法,它能够自动调整控制器参数,提高控制系统动态特性,并具有一定的抗干扰能力。

第五章 “智能先锋”控制系统实验分析

通过前面的分析,我们已经建立了车辆纵向及横向的动力学模型,并在此基础上设计了面向城市环境的无人驾驶车辆的控制系统,本章将在 Visio Studio2005 环境下,实现前面所设计的控制算法,对整个控制系统进行实车实验,为此设计了不同的实验场景,用以验证无人驾驶车辆在不同环境下的控制性能,并在实验之前进行了城市道路行车安全性的探讨。

5.1 实验设计

按照前述研究结果,无人驾驶车辆控制系统的系统功能是自动控制车辆平稳准确的跟踪上层决策系统规划的路径,能够适应城市复杂多样的行车环境,具有较强的鲁棒性并能保障行车安全。下面利用实验室所搭建的无人驾驶车辆验证平台——“智能先锋”进行典型工况下的系统功能验证试验,对前述关于汽车纵向和横向控制系统各项功能的实现情况进行验证,分别对比、评价了车辆控制器在不同的速度下应用 PID 控制算法和小脑模型 PID 控制算法后不同的车辆参数、结果。车辆行驶轨迹、横摆角速度,车辆行驶速度通过“智能先锋”的 GPS/INS 装置进行采集。

为了更加全面的评价本文所采用的控制算法,采用两种典型的道路作为实验场地,如图 5.1,图 5.2 所示。



图 5.1 矩形实验场地



图 5.2“8”字型椭圆实验场地

图 5.1 为一类似矩形场地，由四段直道和 3 段 90 度弯道组成，该环境可以对无人车在直道、直道接入弯道、弯道转入直道 3 种不同的条件下的控制器指标进行测试。

图 5.2 为一“8”字场地，由于“8”字场地的道路曲率是不断变化的，该环境可以很好地验证控制器在弯道条件下的控制效果。

5.2 面向城市道路的无人驾驶车辆行驶安全性讨论

在城市交通问题中，安全显得格外重要，因此无人驾驶车辆在进入真实道路测试前首先应保证其行驶安全性。车辆在引入人类社会之后，既为人类的生产、生活带来好处，又带来了一些危及人类生命的事故。多数的交通事故都是由于驾驶员的操作不当为引起的，其中由于车辆制动性能较差，在弯道时由于制动不够及时导致车辆偏离预定航线而产生的交通事故占总事故数的三成以上(张殿业, 等,2003)。因此对面向城市道路的无人驾驶车辆行驶安全性研究是非常必要的，并且具有积极的意义。

5.2.1 高速过弯或换道的行驶安全性

人类对车辆的一些不当的操纵行为会使车辆发生侧翻、甩尾、侧滑的危险。对无人车系统来说，控制器产生不当的输出也会发生同样的危险。因此，对车辆控制安全性的研究是非常有必要的。

前面两章为了便于分析，将车辆横向运动与纵向运动分开讨论，而忽略了其

间的相互耦合作用。实际行驶在城市道路中的汽车是一个参数不固定且不可线性化的系统,在不同的纵向车速条件下,车辆的横向运动模型是不一样的,车辆轮胎的横向力在纵向上的分力对纵向速度也存在着影响,尤其是在弯道变速行驶时,要兼顾横向控制与纵向控制的参数,不能只单独考虑一种参数,而忽略了另一种参数的影响,所以,将横向控制与纵向控制的参数独立开来,影响控制精度,从而影响车辆行驶的安全性。

当驾驶员转动汽车方向盘后,转向系统使车辆轮胎形成侧偏角,由此形成了施加在车身的横向力,在横向力的作用下,车辆发生横摆运动(安部正人, 1998)。汽车在弯道半径较大的路径下以较高车速行驶时,此时车轮和路面有足够的附着力,轮胎产生的侧向力与侧偏角之间近似是线性关系,并且车辆会表现出一些不足转向的特征,由于汽车的质心侧偏角非常小。

根据车辆动力学理论,车辆的转向特性有过度转向、中性转向、不足转向三种稳态转向特性(Rajesh Rajamani,2006)。当汽车高速行驶时,在不足转向的情况下,在线性区间内容易操控。而具有中性转向的车辆极易变成过度转向,易发生稳定性问题造成车辆的失控。在附着系统的制约下,在较大侧偏角的情况下,改变车辆的转向角对车辆横摆角速度产生很小的改变,这与在低速下的横摆角速度有很大不同。在干燥路面上,车辆在侧偏角大于 10° 的情况下会失去操控性,而在积雪路面上,侧偏角只要达到 4° 车辆就会失去操控性。因此对于无人驾驶汽车来说,应当确保车辆横向力保持在线性范围内,这样,就可以保持车辆在道路上行驶时更加安全、平稳。

5.2.2 路径跟踪的安全转向约束

考虑行车过程中的安全性策略,要确保无人车安全、平稳地跟随决策系统规划的路径,我们以侧偏角和横摆角速度安全限制为依据,计算车辆转向控制的输出量约束。如果路面摩擦系数不能提供高横摆角速度下的轮胎力,那么尝试去得到根据轨迹计算出的期望横摆角速度是不安全的,此时的期望轨迹为不合理的,为了保证车辆能够安全行驶应对其加以限制,理想的横摆角速度必须控制在根据与轮胎—路面摩擦系数的关系所确定的上限值范围内。

由车辆动力学可知,当车辆以速度 V 行驶在半径为 R 的轨道上,车辆的期望侧偏角为:

$$\beta = \frac{l_f}{R} + \frac{l_r}{2C_{\alpha}(l_f + l_r)} \frac{mV^2}{R} \quad (5.1)$$

车辆稳定行驶在半径为 R 的轨道上时,前轮稳态转向角与车速 V 及轨道半径 R 的关系有:

$$\delta_{ss} = \frac{l_f + l_r}{R} + \frac{ml_r C_{ar} - ml_{af} C_{af}}{2C_{af} C_{ar} (l_f + l_r)} \frac{V^2}{R} \quad (5.2)$$

结合以上两式有:

$$\beta_{des} = \frac{l_r + \frac{l_f m V^2}{2C_{ar} (l_f + l_r)}}{(l_f + l_r) + \frac{m V^2 l_r C_{ar} - m V^2 l_{af} C_{af}}{2C_{af} C_{ar} (l_f + l_r)}} \quad (5.3)$$

由实际实验得出, 侧偏角的阈值为:

$$\beta_{upper_bound} = \tan^{-1}(0.02\mu g) \quad (5.4)$$

一般干路面的摩擦系数 $\mu=0.9$, 对应侧偏角上限为 10° ; 积雪路面摩擦系数 $\mu=0.35$, 对应侧偏角上限为 4° (Tohru Yoshioka, 1999)。

由式(5.3), 代入表 4.1 所列出的车辆动力学参数, 可得侧偏角的上限值为:

$$\beta_{upper_bound} = \frac{1.595 + 0.01144V^2}{3.025 + 0.003875V^2} \delta \quad (5.5)$$

根据上式可知, 在车辆实时速度的限制下, 前轮转角的上限值与速度的关系可用如图 5.3 的关系表示。例如, 当速度为 80km/h (22.2m/s) 前轮方向角的上限值为 8° , 超过 8° 就可能会发生侧翻的危险。

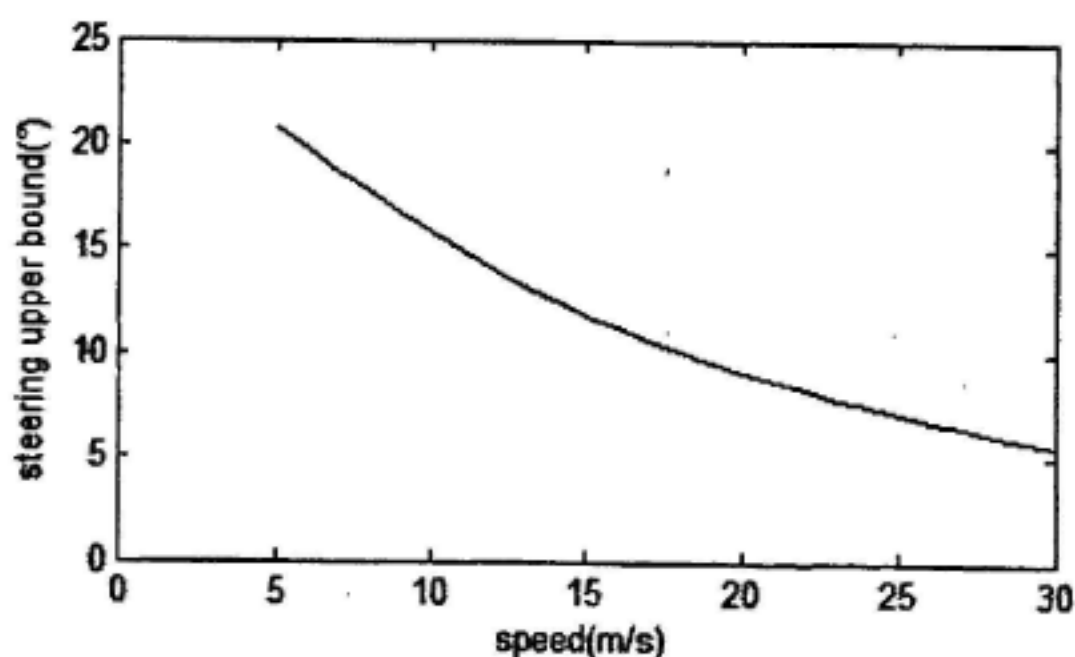


图 5.3 速度对应前轮转角的侧翻临界值

汽车在弯曲的道路上行驶时, 质心的横向加速度为:

$$a_y = \dot{x}\dot{\psi} + \ddot{y} \quad (5.6)$$

式中, \dot{y} 为车辆横向速度, \dot{x} 为车辆纵向速度, $\dot{\psi}$ 为车辆横摆角速度, 由

于

$$\dot{y} = \dot{x} \tan(\beta) \quad (5.7)$$

横摆角速度和车辆侧偏角以及横向加速度的关系为:

$$a_y = \dot{x} \dot{\psi} + \ddot{x} \tan(\beta) + \frac{\dot{x} \dot{\beta}}{\sqrt{1 + \tan^2(\beta)}} \quad (5.8)$$

横向加速度也必须受到轮胎—地面摩擦系数 μ 的限制:

$$a_y \leq \mu g \quad (5.9)$$

若除非紧急情况, 则在考虑行车安全的基础上还需兼顾乘坐舒适性, Wonslaik Chee(1991)和 (Masato Abe, et al., 2001) 中提到, 为了保持乘坐的舒适性, 在公路和城市道路上, 通常横向加速度建议 $a_y \leq 0.6 \text{m/s}^2$, 这也是在许多车辆弯道行驶控制研究中常用的数据。

横向加速度的计算主要由式(5.8)首项决定。如果车辆侧偏角和它的导数都比较小, 第二项和第三项只占总的横向加速度很小的部分。因此综合(5.8)式和(5.9)式, 横摆角速度的上限确定为:

$$\dot{\psi}_{upper_bound} = 0.85 \frac{a_{upper_bound}}{V} = \frac{0.51}{V} \quad (5.10)$$

根据车辆动力学有, 车辆行驶速度为 V , 前轮转角为 δ 时, 理论横摆角速度为:

$$\dot{\psi} = \frac{V/(l_f + l_r)}{1 + \frac{m}{(l_f + l_r)^2} \left(\frac{l_f}{C_{af}} - \frac{l_r}{C_{ar}} \right) V^2} \delta \quad (5.11)$$

表 4.1 所列出的车辆动力学参数, 可得横摆角速度的上限值为

$$\dot{\psi}_{upper_bound} = \frac{V/3.025}{1 + 0.00032V^2} \delta = \frac{0.51}{V} \quad (5.12)$$

根据上式可知, 在车辆实时速度的限制下, 前轮转角的上限值与速度的关系可用如图 5.4 的关系表示。例如, 当速度为 80km/h (22.2m/s) 时, 前轮方向角的上限值为 1° , 超过 1° 人的乘坐感受会变差, 会明显感觉到因横向加速度较大而产生的横向甩动。

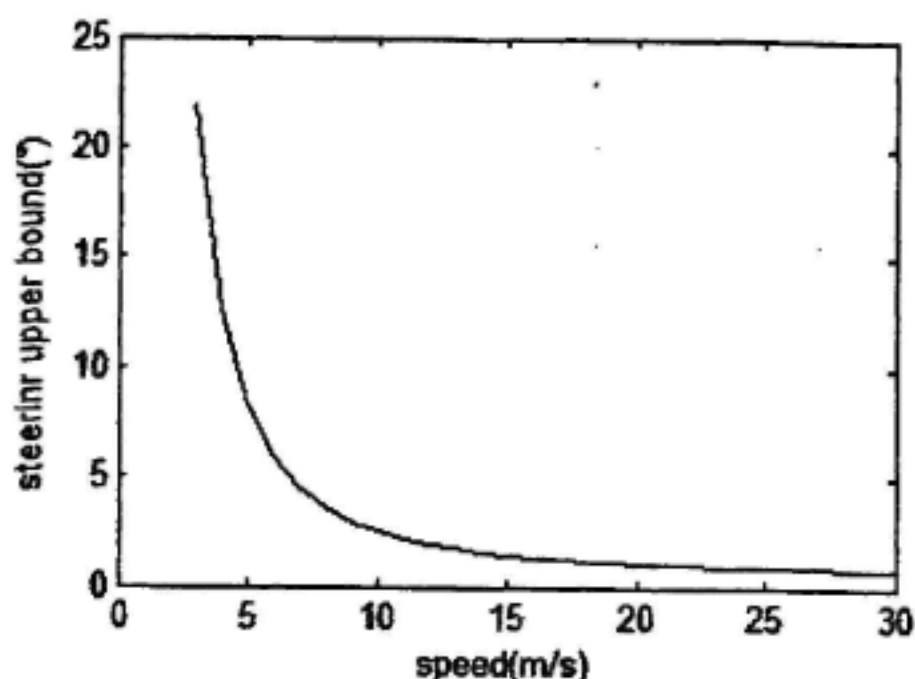


图 5.4 速度对应前轮转角的舒适度临界值

为了车辆行驶安全并考虑到乘坐舒适性,车辆的驾驶行为就应该尽可能的远离图 5.3 和图 5.4 所示的极限取值,车辆的横摆角速度和侧偏角不能过大。对于轨迹跟踪的横向控制器,输出过大的转向角容易引起控制系统超调,在速度较高的情况下,甚至会导致系统失控,失控后的车辆可能偏离期望轨迹而引起碰撞的危险。

5.2.3 安全速度约束

如前文所述控制器同时输出过大的速度值和过大转角时,系统会失去稳定。因此需要对车辆的期望轨迹做出预先计算,期望轨迹的曲率较大时需要提前降低速度,让车辆平缓行驶过弯。

根据第四章的分析有,车辆以速度 V 通过半径为 R 的圆轨道时,期望横摆角速度为:

$$\dot{\psi}_{des} = \frac{V}{R} \quad (5.13)$$

当期望横摆角速度大于上文的横摆角速度上限时,就应提前降低速度设定值。

若定义 θ_{des} 为控制器根据期望横摆角速度计算输出的期望前轮转角,根据图 5.1 和图 5.2 所示极限情况下前轮转角与速度的关系图,可以求出 θ_{des} 转角对于的侧偏角极限速度 v_s 和横摆角速度极限速度 v_y 。此时定义纵向控制器的速度设定值为:

$$v_{des}(k) = \min[V_0(k), v_s(k), v_y(k), v_E(k)] \quad (5.14)$$

其中 $V_0(k)$ 为该路段交通规则规定的速度限制； $v_x(k), v_y(k)$ 上文已定义； $v_e(k)$ 为决策系统的速度设定，该速度考虑了其他车辆的前后安全车距及侧边的突发情况。

5.3 实验结果及分析

(1) 基于 PID 控制算法的矩形路径跟踪实验

PID 跟踪控制的一个特点是能够较为准确的跟踪一条路径函数为一阶、二阶且导数不连续的路径。为了评价算法的性能，实验中“智能先锋”将以 10m/s 和 20 m/s 的速度对这条类似矩形的路径进行轨迹跟踪实验，并在不同的速度下设定不同的预瞄距离，速度越快需要预瞄距离越远，以增加阻尼来保证控制系统的稳定。实验在 10m/s 和 20 m/s 的速度下分别取预瞄距离为 15m 和 20m，实验结果如图 5.5、图 5.6 所示。

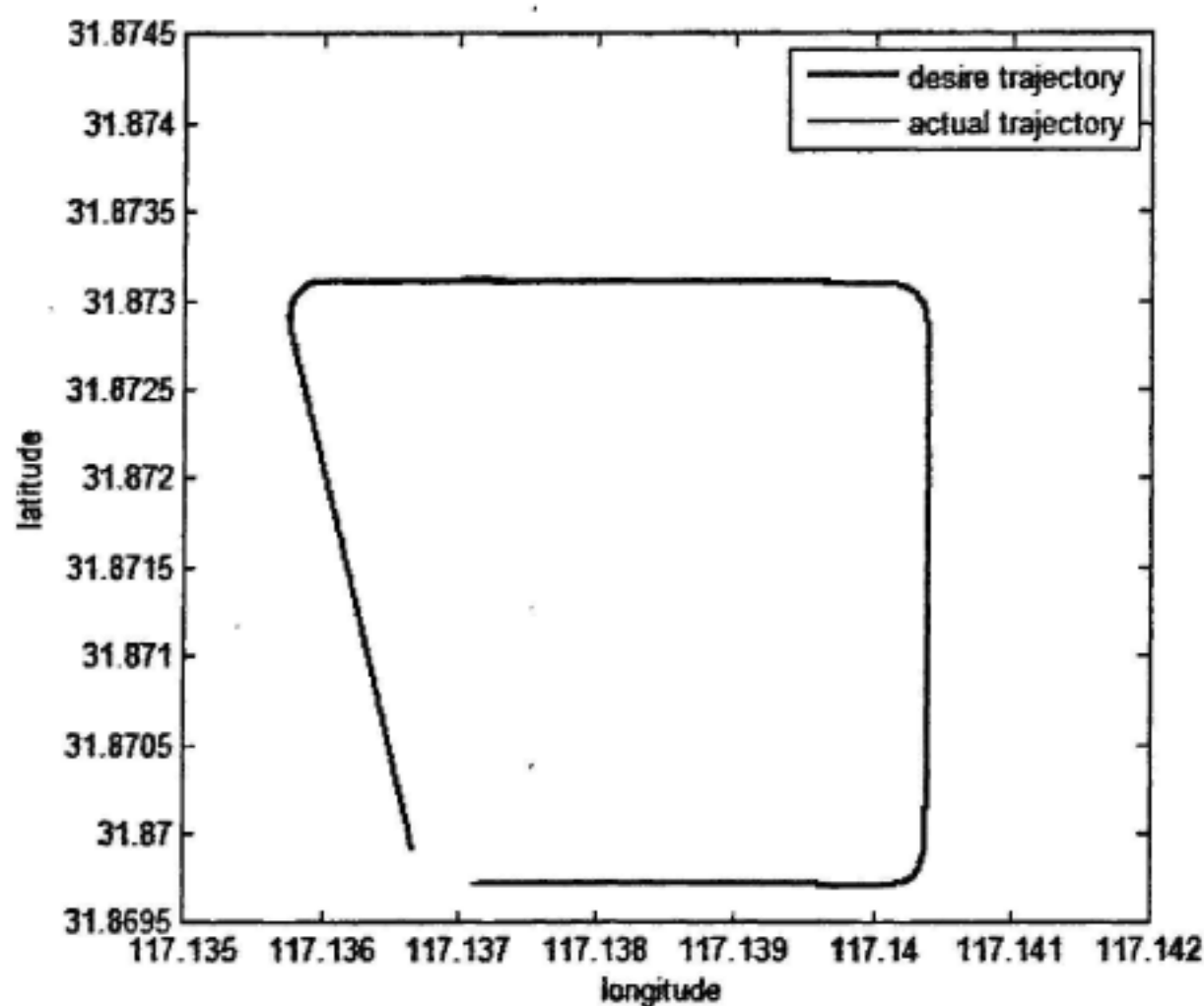


图 5.5 PID 控制算法 10km/h 轨迹跟踪结果

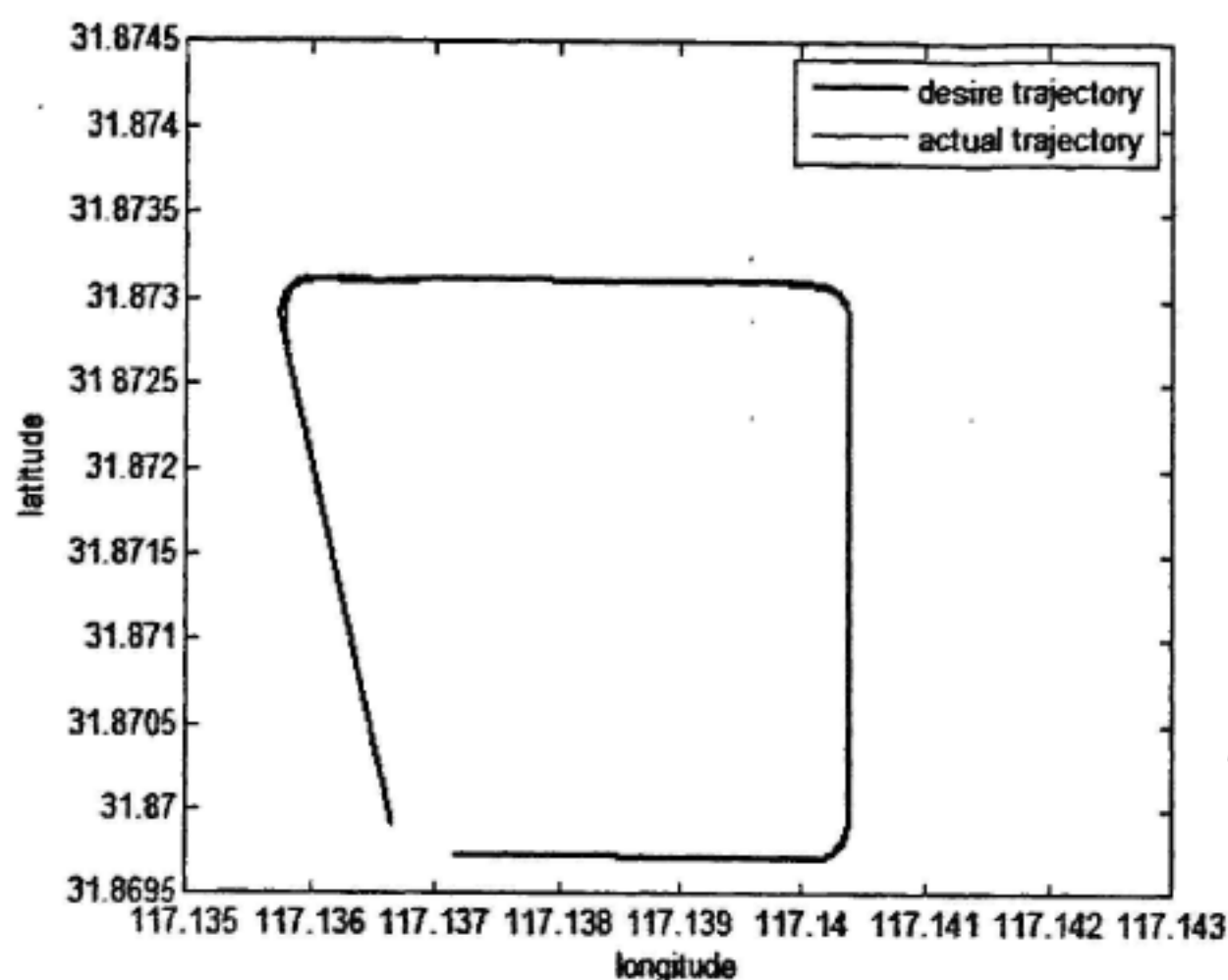


图 5.6 PID 控制算法 20km/h 轨迹跟踪结果

从图中，明显可以看出，采用 PID 控制算法的预瞄跟随控制器，通过预先设定预瞄距离的方式，车辆能够以较为平滑的方式通过 90 度（或略小于 90 度）的转弯，在 10km/h 速度时，对期望轨迹跟踪的误差很小，但当速度增加时，若采用同样的 PID 参数，转弯时的精度开始下降，在 20km/h 速度下转弯处跟踪误差最大达到 4m，见图 5.7。由于速度的增加和前轮转角角度的增加同时影响了之前所建立的简化车辆模型的精度，并且使被控对象呈现非线性特性，此时系统的动态特性已经发生了变化，理想状况下所整定的 PID 控制器对于变化的控制对象难以实施最优的控制效果。当速度增加到 30km/h 以上时，系统开始出现震荡，车辆将在期望轨迹左右出现蛇形的轨迹。

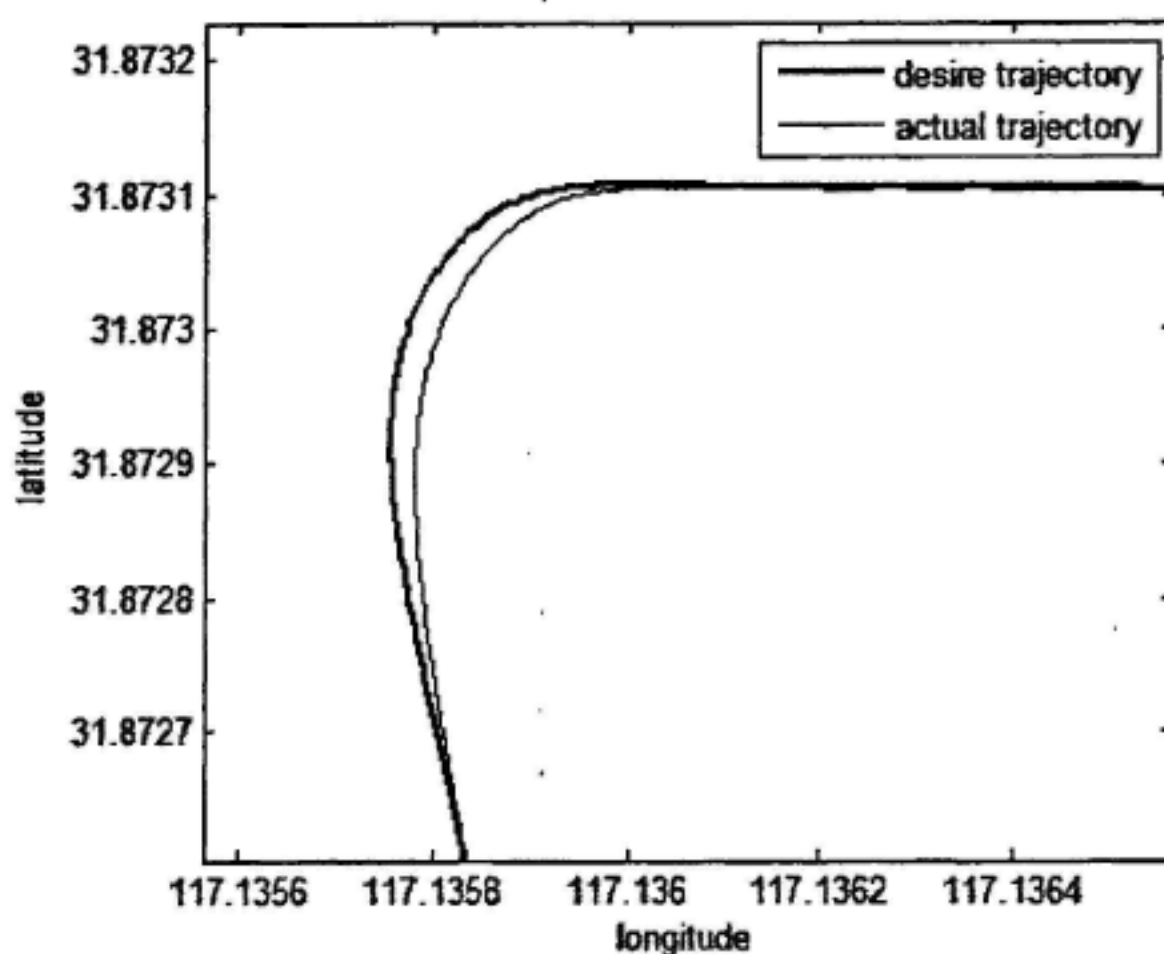


图 5.7 PID 控制 30km/h 轨迹跟踪转弯处误差

由以上实验结果可见，PID 跟踪控制在曲率不大的路径，以低速行驶时跟踪精度较为准确并具有一定的鲁棒性，当速度提高时，系统动态特性发生改变，原有的 PID 参数不能达到最优的控制效果，因此设计一种能够实现根据系统动态特性的变化自动调整 PID 参数的自整定 PID 控制系统是非常必要的。

(2) 基于 CMAC 与 PID 复合的控制算法的矩形路径跟踪实验

由上一节实验结果可知 PID 跟踪控制在低速或直线跟踪时，控制效果很好，但当系统表现出非线性特性时，PID 的跟踪精度就开始下降。为了适应城市环境的多样性，前面设计了 CMAC 与 PID 复合的控制器能够自动的适应系统动态特性的变化，下面将以实验验证 CMAC 与 PID 复合的控制器在类矩形轨迹和 8 字型轨迹条件下的跟踪效果。

实验中“智能先锋”将以 30 m/s 和 60km/h 的速度对这条类似矩形的路径进行轨迹跟踪实验，实验结果如图 5.8、图 5.9 所示。

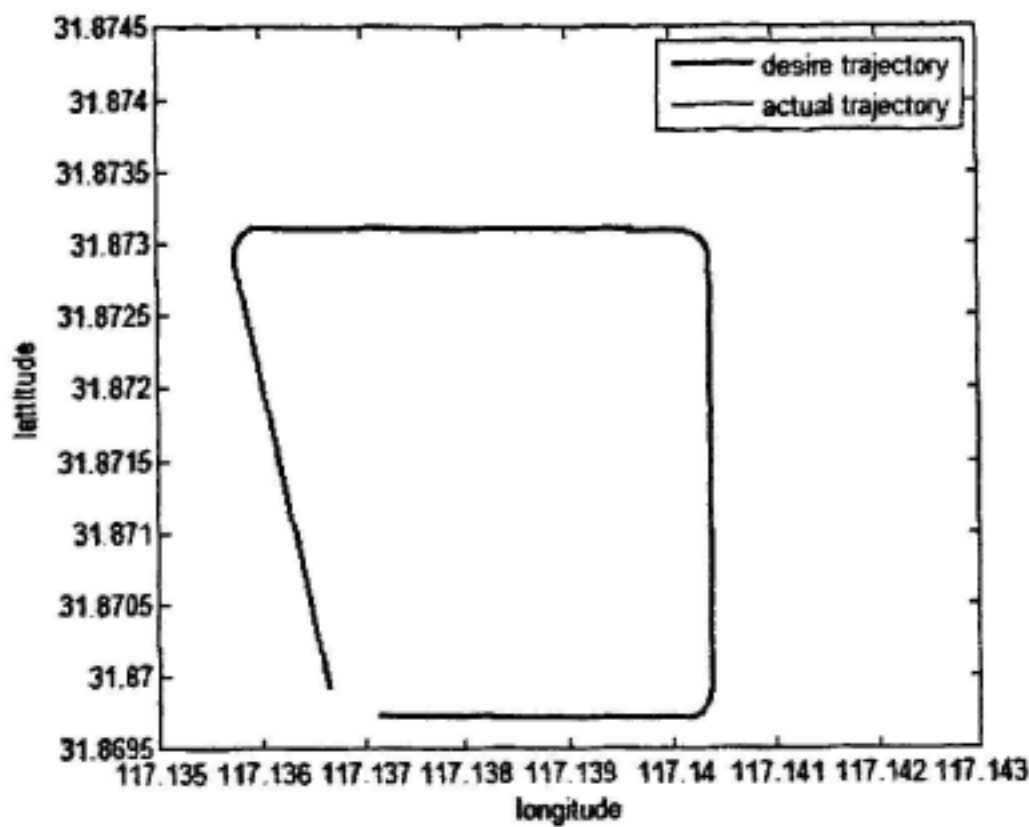


图 5.8 CMAC 与 PID 复合控制 30km/h 轨迹跟踪结果

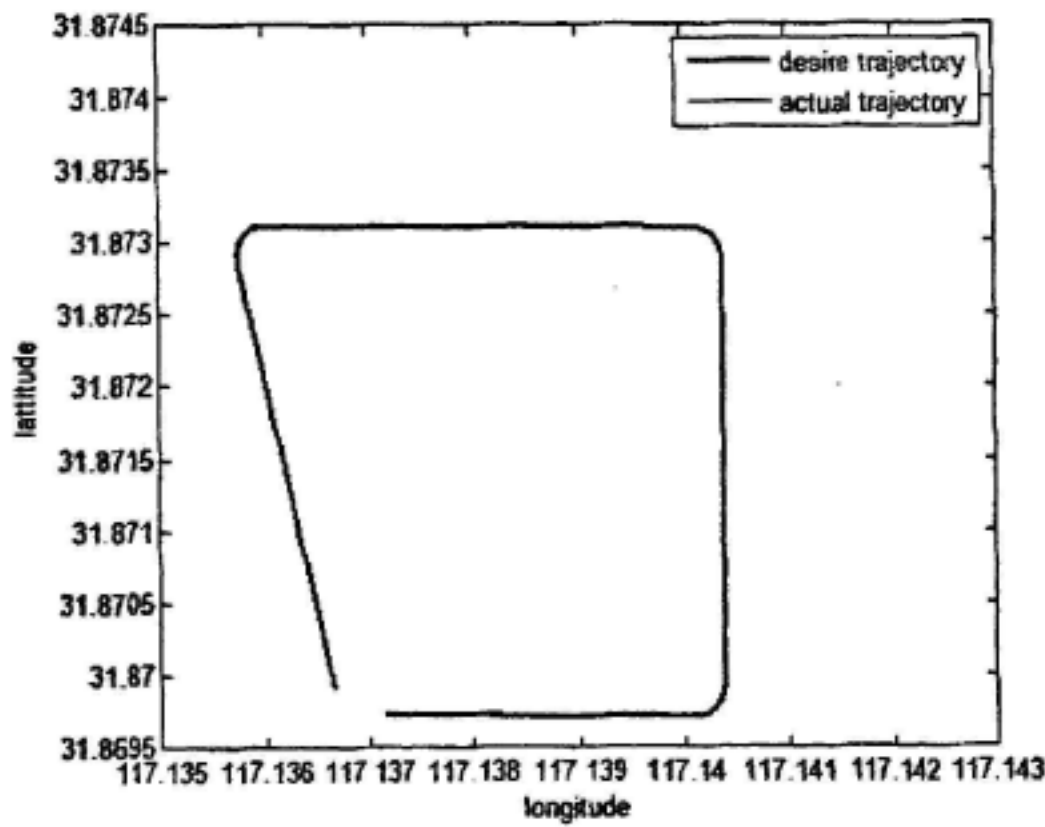


图 5.9 CMAC 与 PID 复合控制 60km/h 轨迹跟踪结果

从上图中可以看出，采用 CMAC 与 PID 复合的控制算法后，车辆能够在 30km/h 和 60km/h 时以较为平滑的方式通过 90 度（或略小于 90 度）的转弯，跟踪误差较小。

由于 60km/h 的速度转 90 度的转弯容易发生危险，上文所提及的安全转向和速度约束机制根据期望轨迹的曲率预先限制了设定速度，图 5.9 记录了 60km/h 行驶过程中速度的设定值和速度跟踪情况，从图中看出根据安全约束机制，在转弯处的速度会及时的降低，又由车辆纵向控制器对平稳性的要求，车辆在完成转弯处的速度会及时的降低，又由车辆纵向控制器对平稳性的要求，车辆在完成转弯

弯进入直道后实时速度平缓提升。图 5.10 和图 5.11 分别记录了两组实验过程中的跟踪误差,图 5.10 说明在 CMAC 与 PID 复合的控制算法作用下车辆以 30km/h 的速度跟踪轨迹误差最大为 0.5m, 比纯 PID 控制方法的跟踪精度提高很多; 图 5.11 说明在转弯处根据安全速度约束降低速度后, 能够提高系统跟踪精度, 跟踪误差最大为 0.4m。图 5.12 和图 5.13 分别记录了在矩形路径行驶过程中的横摆角速度和纵向加速度, 从图中看出行驶过程中横摆角速度变化范围为 $[0,0.4]$,纵向加速度变化范围为 $[-2.5,1]$, 符合行驶平稳性和舒适性的要求, 实现了预期的设计目标。

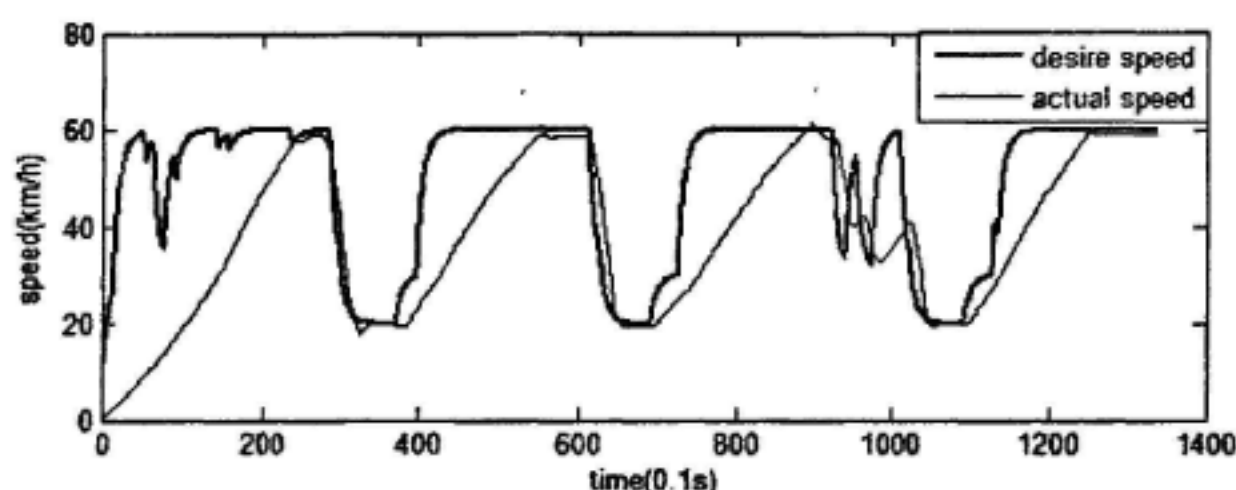


图 5.9 60km/h 轨迹跟踪的速度设定及速度跟踪结果

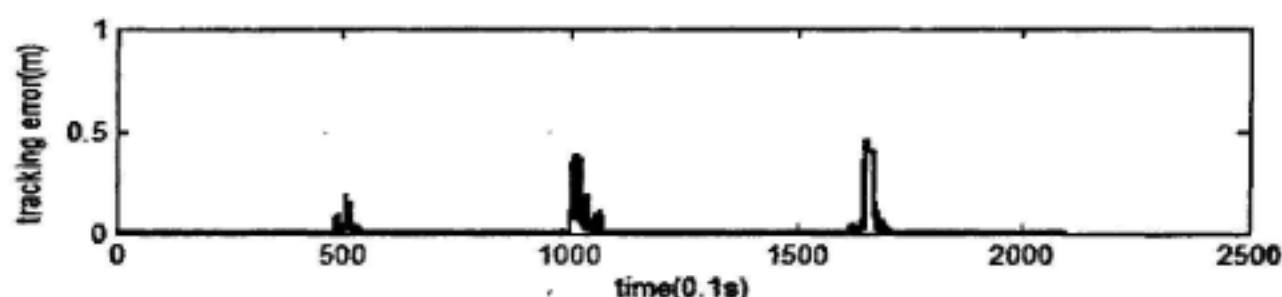


图 5.10 30km/h 轨迹跟踪的跟踪误差曲线

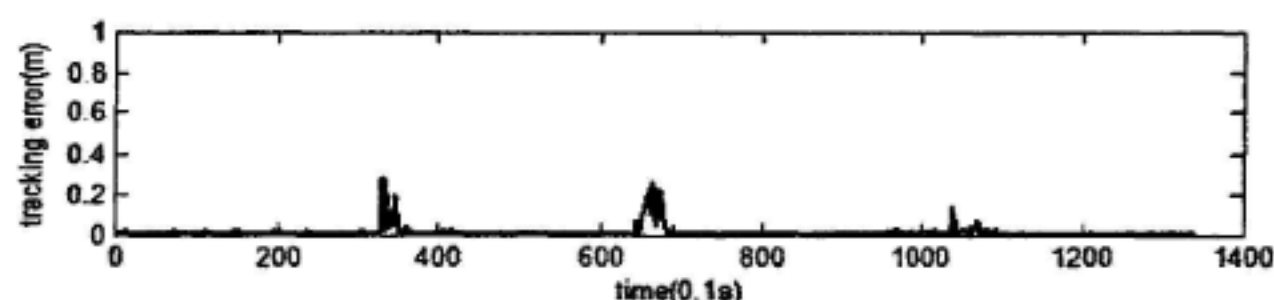


图 5.11 60km/h 轨迹跟踪的跟踪误差曲线

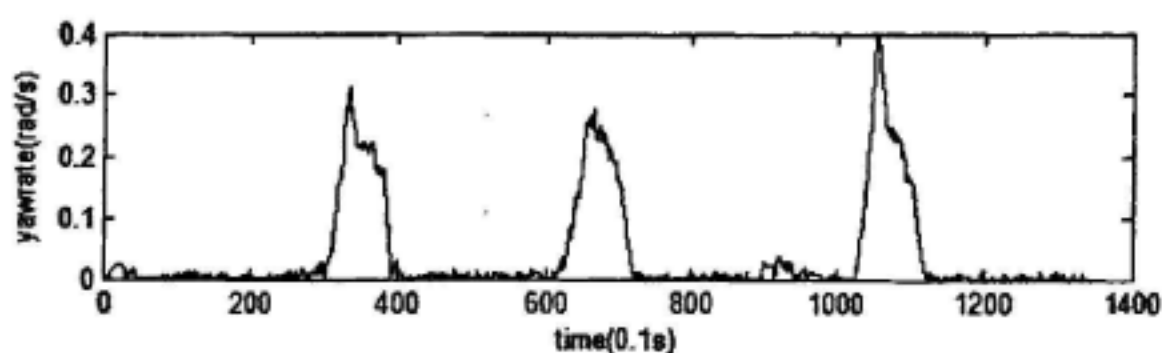


图 5.12 60km/h 轨迹跟踪的横摆角速度变化曲线

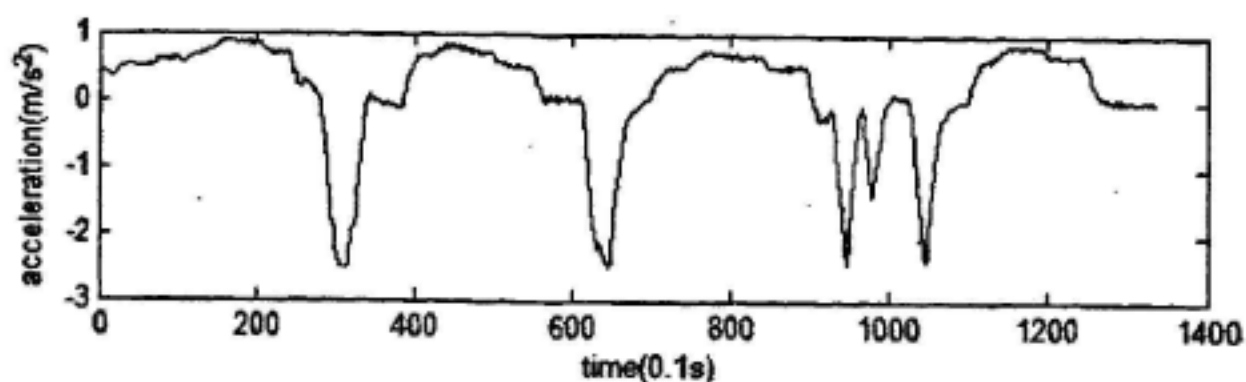


图 5.13 60km/h 轨迹跟踪的纵向加速度变化曲线

(3) 8 字形轨迹跟踪

为了验证“智能先锋”无人车弯道行驶的性能，并对比纯 PID 与基于 CMAC 与 PID 复合的控制算法的效果，实验以 15m/s 的速度分别使用这两种控制算法对“8 字型”的路径进行轨迹跟踪实验，为了保证轨迹跟踪的精度，实验选择较短的预瞄距离。图 5.14 和图 5.16 分别记录两组实验的跟踪结果，图示可见。实验中，由图 5.15 可见采用 PID 控制在车辆转过第二弯道时，系统由于超调产生了震荡而终止了实验，而采用 CMAC 与 PID 复合的控制方法后能够有效抑制系统超调，并顺利通过了后两个更急的转弯。

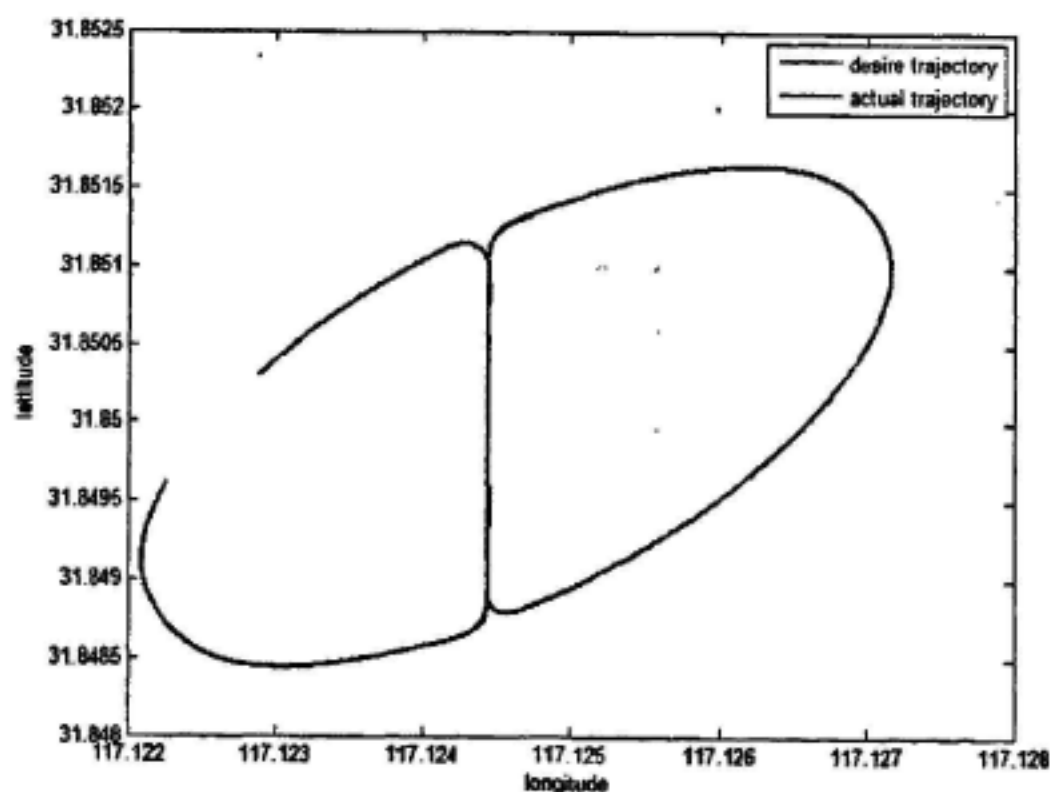


图 5.14 PID 控制 15km/h 轨迹跟踪结果

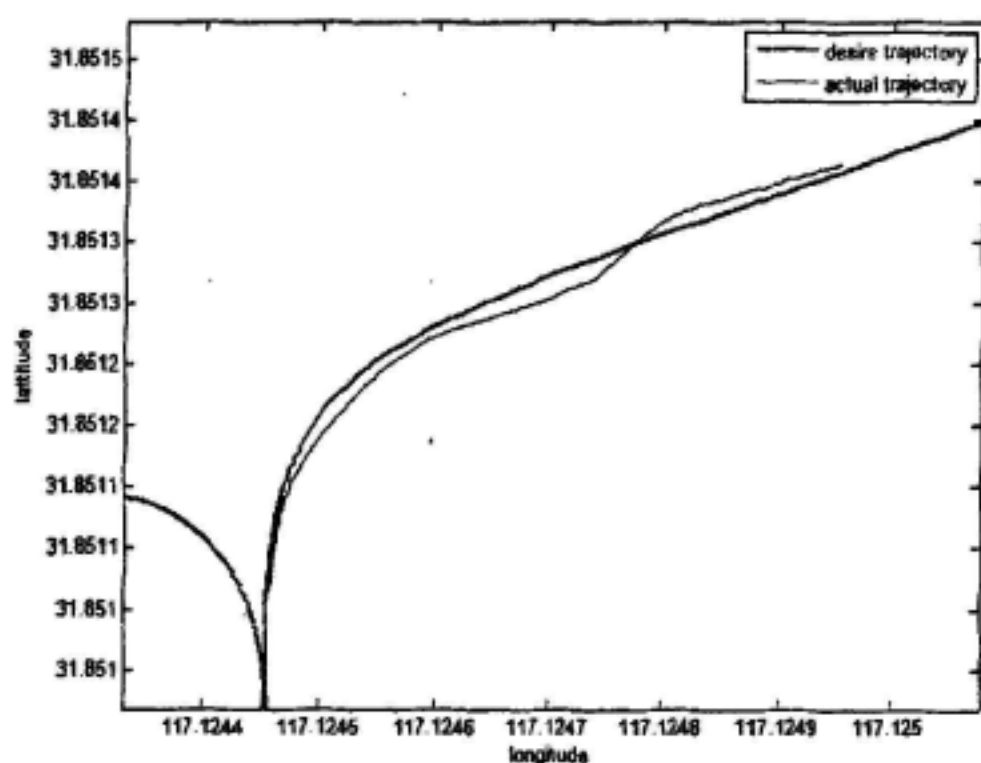


图 5.15 PID 控制 15km/h 轨迹跟踪转弯处误差

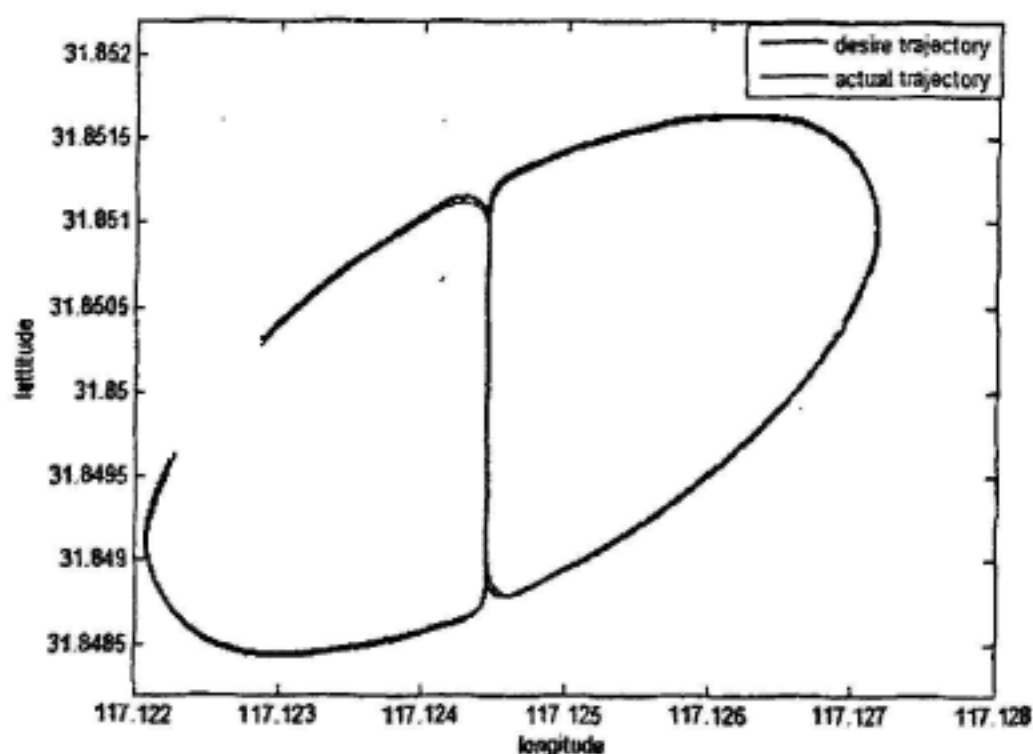


图 5.16 CMAC 与 PID 复合的控制 15km/h 轨迹跟踪结果

图 5.17 和图 5.18 记录了两组实验过程中的横摆角速度，分析可见图 5.17 的最后出现了很大的震荡，车辆出现了蛇形运动，导致实验必须终止，图 5.18 所记录的横摆角速度没有出现上下波动表明车辆在转弯时没有出现超调，行驶过程很稳定，实验结果验证了基于 CMAC 与 PID 复合的控制方法比纯 PID 控制方法更稳定，更适用于路径曲率变化范围较大的跟踪。

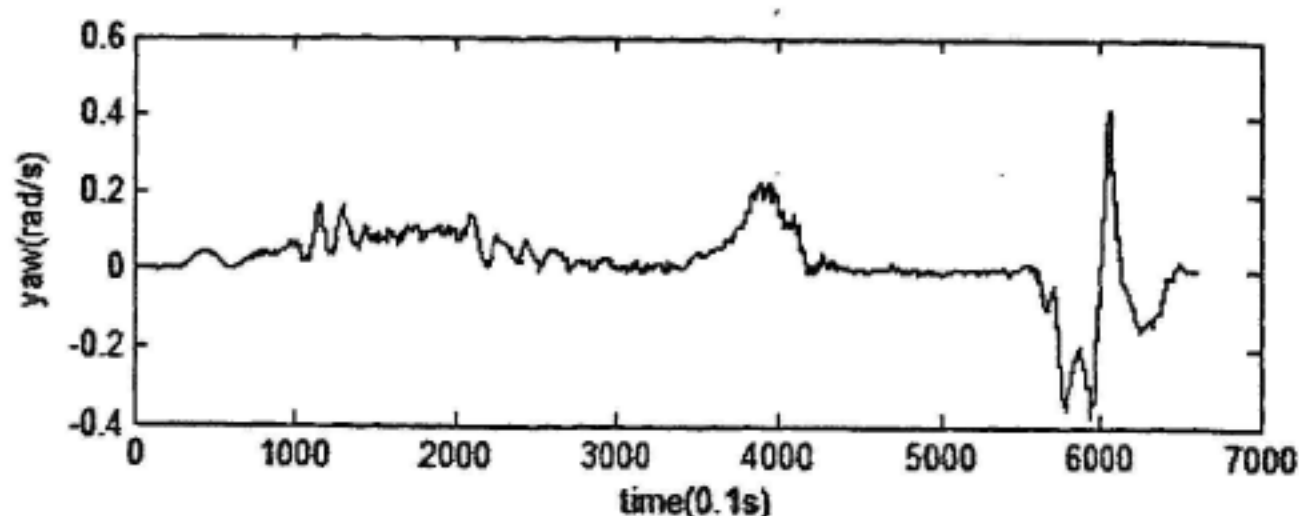


图 5.17 PID 控制 8 字形轨迹跟踪的横摆角速度变化曲线

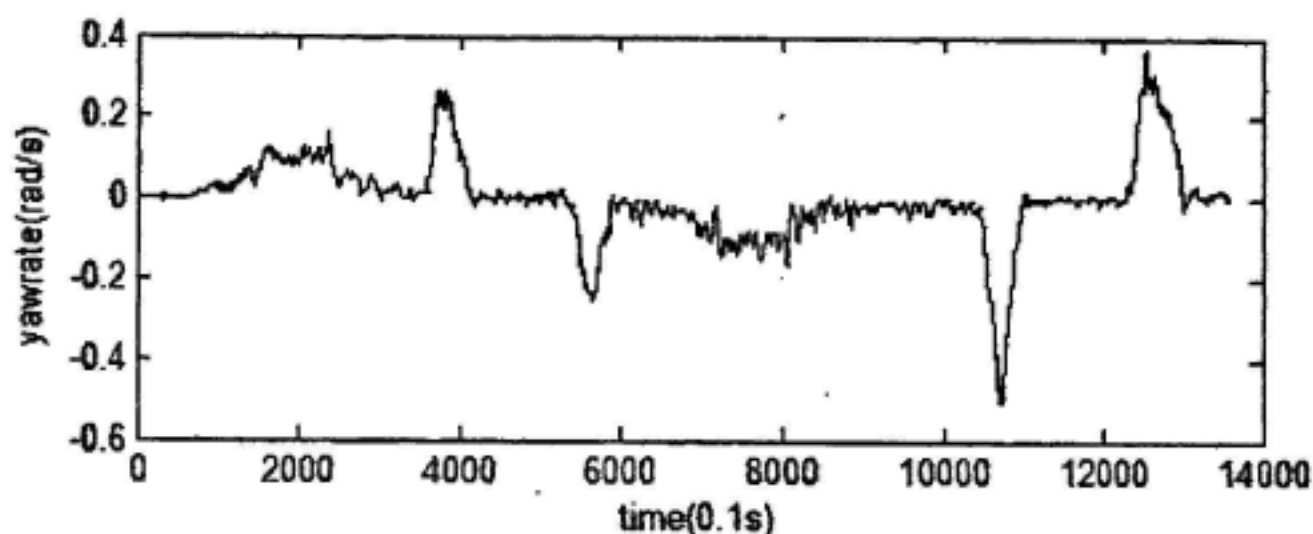


图 5.18 CMAC 与 PID 复合控制 8 字形轨迹跟踪的横摆角速度变化曲线

(4) 基于安全约束的 8 字形轨迹跟踪

为了进一步验证基于 CMAC 与 PID 复合控制的控制算法控制车辆进行弯道行驶的性能,实验以最高速度 30km/h 的速度对 8 字型的路径进行轨迹跟踪实验。由之前的矩形路径跟踪实验可知,车辆期望速度的选择也对控制算法的效果有着显著地影响。期望速度越大的话,为了保证车辆行驶的安全性和稳定性,前面的章节提到了前轮转向角的约束条件,为了使转向角尽量小,其预瞄距离就越大,其相应的跟踪误差就会越大。从图 5.16 的跟踪结果中也可以看出,在跟踪较急的两个转弯时,出现了较大的轨迹误差,因此为了不损失跟踪精度就需要对速度加以限制。根据前文所规定的安全速度约束,30km/h 速度的跟踪实验中根据弯道的曲率改变的速度的设定值,图 5.18 记录实验跟踪路径的结果,由图可见车辆对轨迹跟踪的非常准确。图 5.19 和图 5.20 记录 15km/h 匀速跟踪路径和根据安全速度限制的 30km/h 变速行驶过程中的误差数据。由图可见,15km/h 匀速行驶时在两个急转弯处出现误差的峰值,误差接近 2m,在曲率较小或直线路段误差才能保持在 0.5m 以内,当根据道路曲率提前对设定速度进行控制后,全程的误差都能够保持在 0.5m 范围内。

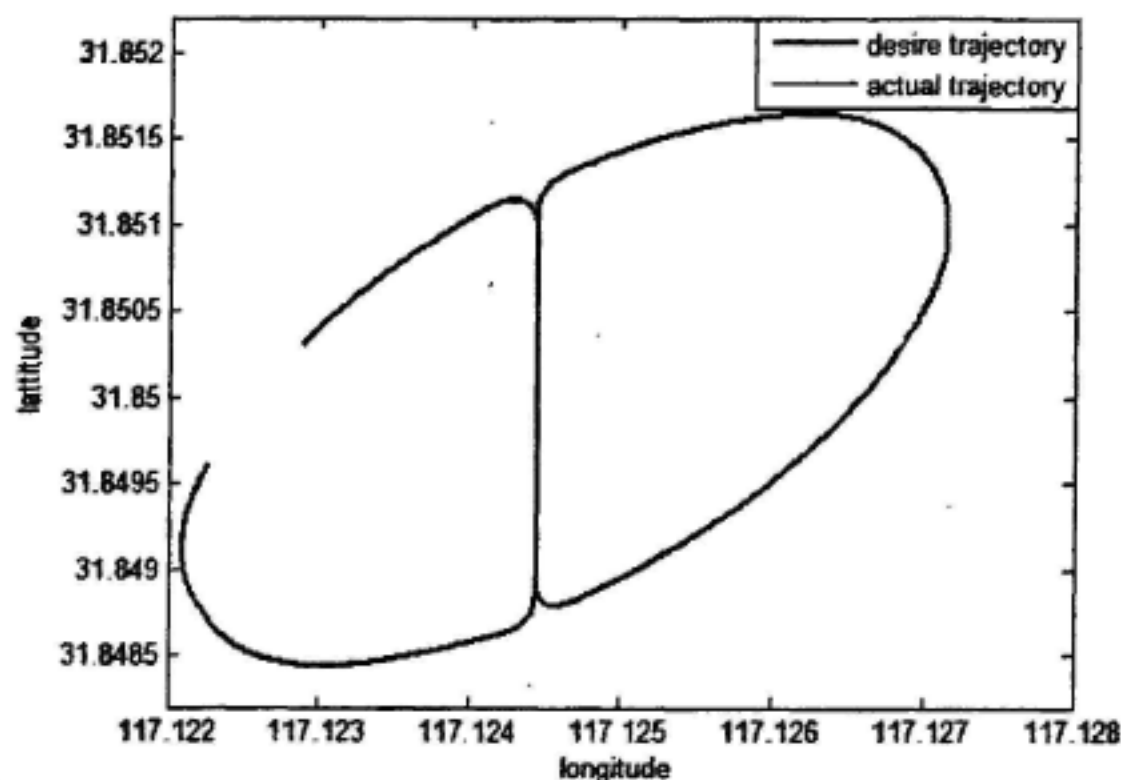


图 5.18 CMAC 与 PID 复合控制 30km/h 变速度轨迹跟踪结果

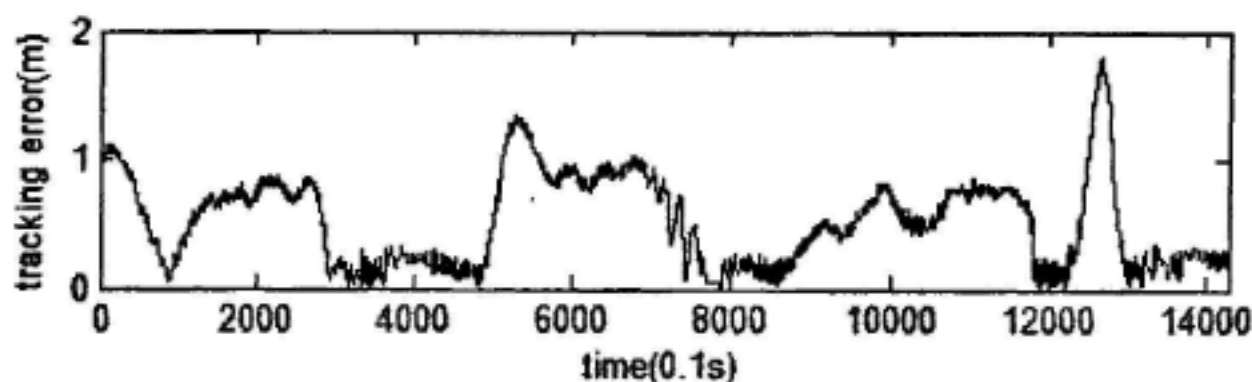


图 5.19 15km/h 速度轨迹跟踪误差

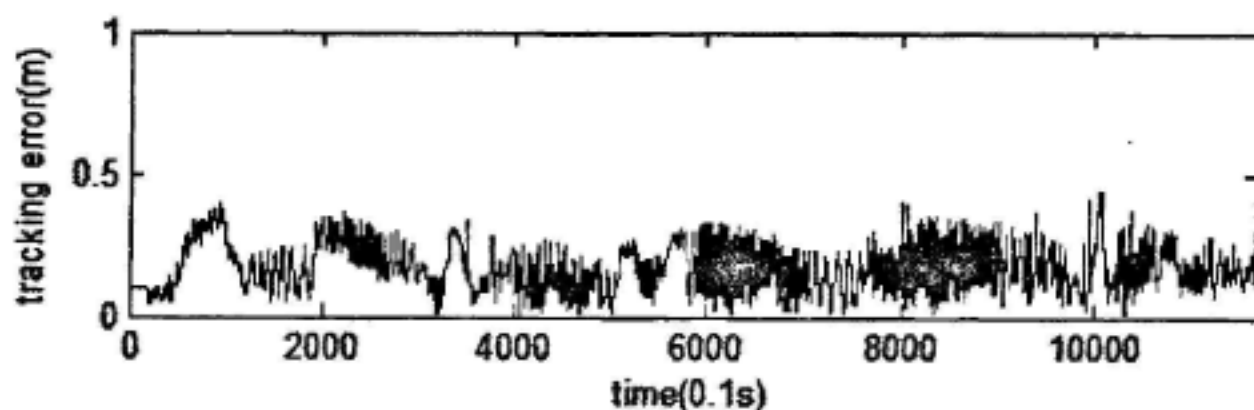
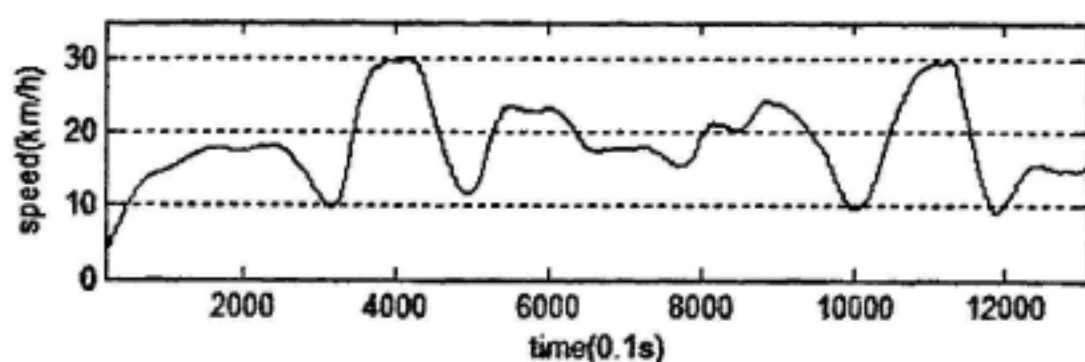


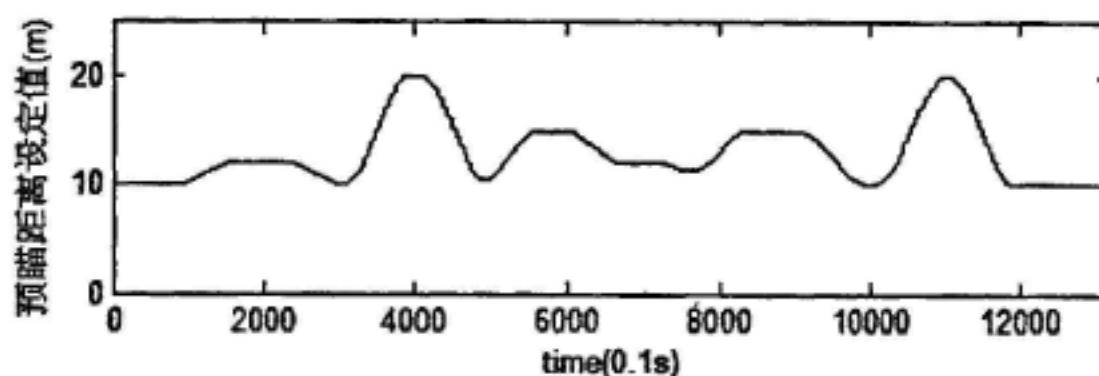
图 5.20 30km/h 变速度轨迹跟踪误差

图 5.21(a)记录了在实验过程的速度数据,可见车辆行驶在四个转弯时,车速降至接近 10km/h,在直道路段行驶时速度为 30km/h,在弯道行驶时,根据弯道的曲率控制车速在 20km/h 左右。图 5.21(b)显示了在实验过程中记录的预瞄距离数据,“智能先锋”在低速的情况下其预瞄距离也较小,这样的设定可以使车辆行驶在弯道中,更加贴合给定轨迹,跟踪误差较小,这一点也符合驾驶员在弯道行驶时的策略,车辆若要通过一些角度较大的弯道,必须提前减速。相反地,如果弯道的曲率较小车辆在速度较高的情况下,其预瞄距离必须随之增大,增大系统的阻尼才能满足驾驶行为平缓稳定的要求,图 5.21(c)记录了实验过程中预瞄

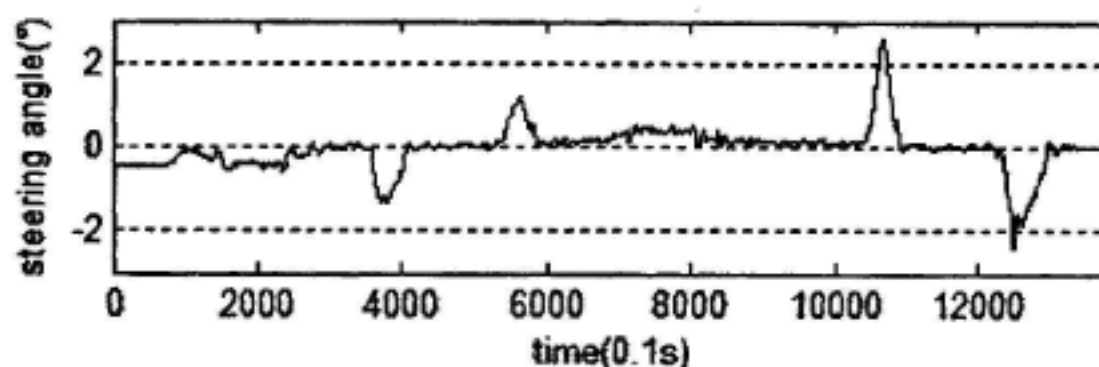
跟随控制器的转向角输出，正如预期的那样，低速过程中的转向角很大，使车辆可以顺利通过急转弯。图 5.21(d)记录了实验过程中横摆角速度的输出，可见横摆角的变化范围在 $-0.5\text{rad/s}\sim 0.5\text{rad/s}$ 之内，保证了车辆行驶过程平稳性。



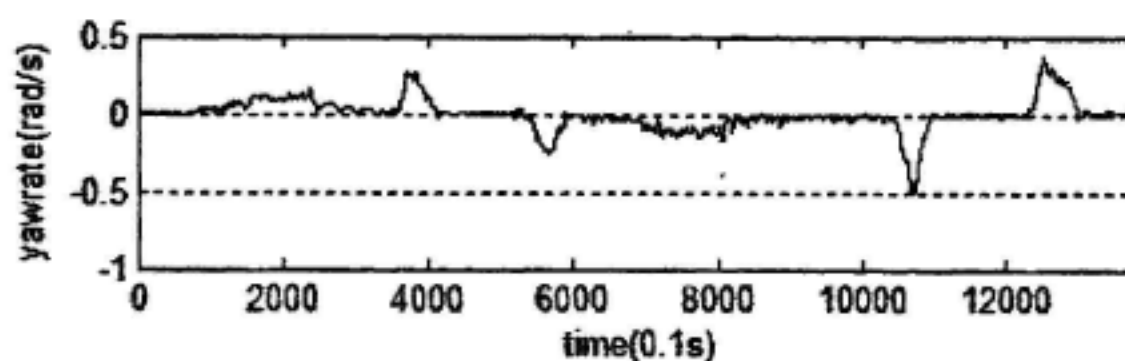
(a)变速度轨迹跟踪速度变化曲线



(b)变速度轨迹跟踪预瞄距离变化曲线



(c)变速度轨迹跟踪控制器转向角输出



(d)变速度轨迹跟踪横摆角速度变化曲线

图 5.21 实验中基于安全约束的各参数变化

以上实验验证了本文所设计的无人驾驶车辆控制系统可以有效地控制汽车按照预期的轨迹和速度行驶，体现出较好的轨迹跟随能力，且对车速、道路状况等汽车行驶过程中的动态不确定性因素具有较强的适应性和鲁棒性。

5.4 本章小结

本章中，根据前文设计的车辆纵向和横向控制设计方法，设计了无人驾驶真实城市环境下的实车实验。并且在实验之前针对城市道路环境的无人驾驶车辆行驶安全性进行了探讨，从高速过弯或换道的行驶安全性和舒适性上考虑了车辆纵向控制和横向控制之间相互制约关系，在保证无人驾驶车辆控制系统的安全稳定性的基础上对控制系统进行了实验验证。实验表明，这种控制系统具有良好的跟踪效果，同时具有安全稳定的特性，符合车辆在城市道路中的行驶要求。

第六章 结论

本文对无人驾驶车辆在城市环境中的运动跟踪、控制技术进行了深入的研究，设计了针对城市环境的无人驾驶车辆纵向和横向控制系统，制定了无人车行驶安全性约束，并在此基础上进行了实车实验验证。本文的主要贡献可归纳如下：

1) 对无人驾驶车辆的工作环境-城市化道路进行了归纳总结，明确了无人车各类行车道路的特点和难点，比如交通结构差，交通工具种类繁多，行驶在城区道路中的摩托车、自行车、人力车、残疾人车数量颇大。市民交通意识差，交通参与人包括汽车驾驶人违章现象较为严重等。进而，阐明了熟练驾驶员在复杂城市道路中行驶所要完成的任务，同时，也表明了无人驾驶车辆控制系统的设计目标，即使得车辆能够像“驾驶员”一样驾驶车辆，平稳行驶，控制准确。

2) 设计、建立了一种基于规则的专家 PID 速度控制系统。在车辆纵向动力学分析的基础上，阐明了行车环境中影响车辆行驶速度的一些关键因素。从而，可知车辆行驶时不确定因素干扰较大，车辆模型实时变化，呈高度非线性，建立较为准确的控制对象模型很困难。而在实际驾驶员对车辆的速度控制中，并不需要了解车辆的准确模型，只要有一定的驾车经验，简单了解车辆的动态特性，就能把速度调整在期望的设定值上。因此，采用专家 PID 控制的方式设计车辆纵向控制器，同时给定了油门与制动控制时的专家规则。在车辆纵向控制的实车实验中，可以看出，在复杂的路况条件下，该控制器依然可以对不同的期望速度进行准确、快速地跟踪。

3) 提出了一种新的基于小脑模型神经网络与 PID 复合的无人驾驶车辆横向控制算法，首先，建立了车辆横向动力学模型，并且根据无人驾驶车辆的模型参数，获得车辆的运动方程，明确了车辆横向稳定性参数横向速度与横摆角速度；接着，利用相对道路的车辆运动学模型，进行了状态反馈控制设计，由于上述控制器的设计建立在道路通畅，并且无较大的转弯的情况下，城区道路已不再适用，进而设计并实现了 CMAC 与 PID 复合控制的车辆横向控制器，该控制器能够自动补偿被控模型和输入信号发生的非预知的变化，解决了由于模型不太精确或存在其他变化因素带来的控制不确定性，使系统仍然能够保持预期设计要求的性能。实验中，通过 Matlab 仿真与基于“智能先锋”智能车辆平台进行实车实验两种方式对控制算法进行了验证，通过与传统 PID 算法进行对比的方式，证明了该控制算法的有效性和优越性。

4) 对面向城市道路环境的无人驾驶车辆行驶安全性进行了深入的研究。具体从高速过弯或换道的行驶安全性、路径跟踪安全约束两方面对行驶安全性进行

阐述, 研究中, 主要考虑了车辆高速行驶时的运动学特性, 车辆纵向控制和横向控制之间相互制约关系, 保证了无人驾驶车辆控制系统的安全稳定性。在此安全保障的基础设计了真实城市环境下的不同场景的实车实验, 进一步验证了本文所设计的无人驾驶车辆控制系统, 它能够解决车辆城市环境道路中自主行驶所面临的问题。

智能车辆技术是近年来新兴的一种不断发展和创新的技术, 体现了当今信息科学与智能控制技术的最新成果。车辆的控制系统研究融合了多种学科知识, 如计算机科学、自动控制、电子信息工程、导航定位技术、检测技术和人工智能等, 研究难度较大。本文虽然在无人驾驶车辆横向与纵向控制的研究中取得了一定的进展, 但仍然有许多问题有待进一步开展和研究:

1) 文中所设计的纵向控制是基于专家 PID 控制的方法, 模拟驾驶员的驾车行为抽象出了一些最基本的规则, 本文这个方面的研究只是个开始, 还需要把专家 PID 控制方法进行深入细致地研究, 需要在各种路况条件下进行与驾驶员实际驾车的对比实验, 研究驾驶员在各种交通状况下对速度的处理行为, 制定相应的专家规则, 以最大程度的“拟人化”实现对车辆速度智能控制的目标。

2) 文中所设计的横向控制是基于 CMAC 与 PID 复合控制的方法, 由于 CMAC 是局部神经网络, 也具备模糊模型的结构, 如果在后续工作中加入模糊控制的思想, 根据实际应用的要求建立模糊规则, 就能成为模糊神经网络。这样的控制系统将会在原有 CMAC 网络的学习速率快和具有自适应性的特点上, 又增加了模糊控制系统所具有的控制方法易于理解, 设计简单透明, 便于实际应用等特点, 并且可以更方便地利用专家知识来修正 CMAC 网络的初始权值, 结合模糊思想的车辆横向控制器将更能灵活的解决各种环境和工况下的系统控制问题。

3) 本文的设计思想都是建立在控制系统自身的性能, 今后的工作应该从无人驾驶车辆的全系统性能考虑。文中所设计的车辆运动控制系统, 将控制系统分为纵向控制和横向控制, 而忽略了垂直方向的动力学影响。但实际道路行驶过程中, 由于道路的起伏或凹凸不平会造成车辆的颠簸, 车辆存在 z 轴方向上的运动和自身的俯仰运动; 另外, 控制车速的改变时对刹车或油门的操作, 都会对车辆的姿态产生影响而改变车辆的俯仰角度, 此时, 传感器可能会发生误检测的现象, 从而使得决策系统的路径决策判断错误。若把以上因素也考虑进去, 用以修正由于车身姿态变化产生的轨迹规划误差, 将会使控制系统的控制精度得到提高。

在国家自然科学基金委员会的支持下国内无人车相关技术得到了快速的发展, 但要实现无人车辆真正的自主行驶还存在较大的差距, 相信在广大研究人员的努力下, 无人驾驶车辆技术及其衍生技术将会大大改善人类的生活。

参考文献

- Albus J. S.1975. Data Storage in the Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC)[J]. J. Dyn. Syst. Meas. Control, Trans. ASME 97, 228-233 (1975).
- Albus J.S. 1975 A new approach to manipulator control: The cerebellar model articulation controller(CMAC)[J].Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control Transactions of ASME,(12):220~227.
- Albus J.S.1991. Outline for a Theory of Intelligence[J]. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 21:473-509 .
- Albus.J. 2002. 4D/RCS: a reference model architecture for intelligent unmanned ground vehicles[C]. SPIE AeroSense Conference, Unmanned Ground Vehicle Technology IV, (Orlando, USA).
- Andrew Bacha and et al.2008.Odin: Team VictorTango's Entry in the DARPA Urban Challenge," Journal of Field Robotics, 25(8): 467-492.
- Astrom K.J. et al.1986.Expert Control[J].Automatica,22(3):277-286
- Bars, R., Colaneri, P., De Souza, C. E., & Duquard, L., Allgower, F., Kleimenov, A., & Scherer, C.2006.Theory, Algorithms and technology in the design of control systems[J]. Annual Review in Controls, 30(1): 19-30.
- Barton M. 2001. Controller development and implementation for path planning and following in an autonomous urban vehicle[D]. University of Sydney, Sydney, Australia.
- Bertozzi M, Bombini L, Broggi A, Buzzoni M, Cardarelli E, Cattani S, Cerri P, Debattisti S, Fedriga RI, Felisa M, Gatti L, Giacomazzo A, Grisleri P, Laghi MC, Mazzei L, Medici P, Panciroli M, Porta PP, Zani P. 2010. The VisLab intercontinental autonomous challenge: 13,000 km, 3 months, no driver[C]. In: Proceedings of the 17th World congress on ITS, Busan, South Korea, Oct. 2010.
- Betrozzi,M., A.Broggi, and A.Fascioli. 2000. Vision-based intelligent vehicles: State of the art and persepectives[J]. Robotics and Autonomous Systems: 1-16.
- Borner, B. and Isermann, R.2005. The Characteristic Velocity Stability Indicator for Passenger Cars[J]. Vehicle System Dynamics, 43(8): 601-612,.
- Brown, K.2004. Adaptive Control Strategy For An Automated Steering Controller[D], [MS]. The Ohio State University.
- Brusaglino,G 1992. Safe and effective mobility in Europe-the contribution of the PROMETHEUS programme[C]. IEEE Colloquium on Prometheus and Drive:101-110.

- Brusaglino, G. 1992. Safe and effective mobility in Europe-the contribution of the PROMETHEUS programme[C]. In IEE Colloquium on Prometheus and Drive, 101-110.
- Byrne, R.H. 1995. Design of a Model Reference Adaptive Controller for Vehicle Road Following[J]. Mathematical and Computer Modelling, 22: 343-354.
- Campion G, Bastin G, Noel B. 1996. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots[J]. IEEE Trans. Robotics and Automation. 12: 47-62.
- Canudas-de-Wit, C. Tsiotras, P., Velenis, E., Basset, M. and Gissinger, G. 2003. Dynamic Friction Models for Road/Tire Longitudinal Interaction[J]. Vehicle System Dynamics, 39(3): 189-226.
- Chiang & Lin. 1996. CMAC with General Basis Functions[J]. Neural Networks, 9(7): 1199-1211.
- Choomuang R, Afzulpurkar N. 2005. Hybrid Kalman Filter/Fuzzy Logic based Position Control of Autonomous Mobile Robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2(3): 197-208.
- Chris Urmson and et al. 2008. Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge[J]. Journal of Field Robotics, 25(8): 425-466.
- Dejun Zhuang. 2007. The Vehicle Directional Control Based on Fractional Order PD μ Controller[J]. Journal of Shanghai Jiaotong, 41(2): 278-283.
- Delorme D., Song B. 2001. Human Driver model for SmartAHS[R], California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2001-12.
- Doi Masayoshi, Mori Yasuchika. 2011. Generalized Minimum Variance Control for Time-varying System[J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 45(6): 298-304.
- Falcone, P., Borrelli, F., Asgari, J., Tseng, H.E. and Hrovat, D. 2007. Predictive Active Steering Control for Autonomous Vehicle Systems[J]. IEEE Transactions of Control System Technology, 15(3): 566-580.
- Fernando A. Auat Cheein, Celso De La Cruz, Teodiano F. Bastos and Ricardo. 2010. SLAM-based Cross-a-Door Solution Approach for a Robotic Wheelchair[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 7(2): 155-164.
- Gao Feng, Li Keqiang, Lian Xiaomin. 2006. Hierarchical switching control of multiple models based on robust control theory[J]. ACTA Automatica Sinica, 32(3): 411-416.
- Gao Feng, Wang Jianqiang, Li Keqiang. 2006. Hierarchical switching control of longitudinal acceleration with large uncertainties[C]. IEEE International conference on vehicular electronics and safety: 270-275.
- Ghanbari A., Noorani S. 2011. Optimal Trajectory Planning for Design of a Crawling Gait in a Robot Using Genetic Algorithm[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 8:

- 29-36.
- Gohl, J., Rajamani, R., Alexander, L. and Starr, P.2002.The Development of Tilt-Controlled Narrow Ground Vehicles[J].Proceedings of the American Control Conference, 2002.
- Guvenc, B. A. & Kural, E. 2006. Adaptive cruise control simulator[J]. In IEEE Transaction on Control Systems Magazine: 42-55.
- Hassler, D., Johnson B. S. and Kinstle, M. F.2009. Vehicle Dynamics Benchmarking and Simulation[N]. SAE Paper 2009-01-0465.
- Hatipoglu, C, Ozguner, U. & Redmill, K. A. 2003. Automated lane change controller design[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 4 (1): 13-22.
- Hedrick J.K., Tomizuka M., and Varaiya P.1994. Control issues in automated highway systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 14(6):21-32.
- Hessburg, T. 1994. Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance[J]. IEEE Control System Magazine, 14: 55-63.
- Junjie, H, Crolla, D.A., Levesley, MC and Manning, W.J.2006. Co-ordination of Active Steering, Driveline and Braking for Integrated Vehicle Dynamics Control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D, Journal of Automobile Engineering, 220(10): 1401-1420, 2006.
- Kamiya,H.1996. Intelligent technologies of Honda ASV[C]. IEEE International conference on Intelligent Vehicles Symposium: 236-241.
- King - Lung Huang etc.1997. Cascade - CMAC Neural Network Application on the Color Scanner to Printer Calibration[R]. Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Neural Networks , 10-15.
- Lacey Gunter, Ji Zhu. 2005. Computing the solution path for the regularized support vector regression[C]. In Advances in neural information processing systems: 483-490.
- Le-Anh T, De Koster MB.2004. A review of design and control of automated guided vehicle systems[J]. Erasmus Research Institute of Management (ERIM), report series no: 2004-03-LIS.
- Lee, H., Tomizuka, M.2001. Coordinated Longitudinal and Lateral Motion Control of Vehicles for IVHS[J]. Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 123: 535-543.
- Lenain R, Thuilot B, Cariou C, Martinet P. 2005. Model Predictive Control for vehicle guidance in presence of sliding: application to farm vehicles path tracking[C]. IEEE Conf. on robotics and automation: 885 - 890.
- Leonard J. and et al.2008.A Perception-Driven Autonomous Urban Vehicle", Journal of Field

- Robotics, -25(10):727-774.
- Lewis, AS, and El-Gindy, M.2003.Sliding mode control for rollover prevention of heavy vehicles based on lateral acceleration[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 10(112): 9-34.
- Li, Y., Ang, K. H., k Chong, G 2006. PID control system analysis and design[J]. In Proceedings of the IEEE Control Systems Magazine: 32-41.
- Li,Z., Jin H. B.2011. Fuzzy Model Reference Adaptive Controller Design for Multivariable Nonlinear System[J]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 5(9): 95-103.
- Liang, C.Y. and Peng, H. 1999. Optimal adaptive cruise control with guaranteed string stability[J]. Vehicle System Dynamics, 32(4): 313-330.
- Lin CS,Chiang CT. 1997. Learning convergence of CMAC technique[J].IEEE Trans.on Neural Network,(8):1281~1292.
- Markoff J. 2010. Google cars drive themselves[N]. in traffic. New York Times. October 9.
- Masato Abe, Yoshio Kano, Kazuasa Suzuki. 2001. Side-slip Control to Stabilize Vehicle Lateral Motion by Direct Yaw Moment. JSAE Review, 22.
- Masato Abe. 2009. Vehicle Handling Dynamics: Theory and Application[M]. Butterworth-Heinemann.
- McRuer, D.T., Hofman,L.G, 1968, New Approaches to Human Pilot / Vehicle Dynamic Analysis[R]. AFFDL-TR-67-150, February.
- Michael Montemerlo and et al.2008.Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge[J]. Journal of Field Robotics, 25(9): 569-597.
- Millerm TW,Glanz FH,Kraft LG 1999. An associative neural network alternative to backpropagation[C]. Proceedings of IEEE, (78):1561-1567.
- Mokhiamar, O. and Abe, M. 2004. Simultaneous Optimal Distribution of Lateral and Longitudinal Tire Forces for the Model Following Control[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control,126: 125-134.
- Pacejka, H.B.1996.The Tyre as a Vehicle Component[C]. XXVI FISITA Congress, Prague, June 16-23.
- Pan Zhao, Jiajia Chen, Tao Mei and Huawei Liang. 2011. Dynamic Motion Planning for Autonomous Vehicle in Unknown Environments[C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium: 284-289.
- Park P., Fischione C., Bonivento A., Johansson K. H., and Sangiovanni Vincentelli A. 2009. Breath: an adaptive protocol for industrial control application using wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 10: 821-838.
- Park PC,Miller J.1989. Convergence properties of associative memory storage for learning control

- system[J]. Automation and Remote Control, (50):254-286.
- Patete A., Furuta K., Tomizuka, M. 2008. Self tuning control based on generalized minimum variance criterion for auto-regressive models[J]. Automatica, 44: 1970-1975.
- Pittle, D. R. 2004. Stability Control – Standard or Optional?[C]. Consumer Union of United States, SAE International 2004 Automotive Dynamics, Stability and Controls Conference and Exhibition.
- Prokop, G. 2001. Modeling Human Vehicle Driving by Model Predictive Online Optimization[J]. Vehicle System Dynamics, 35(1): 19-53.
- Puntunan S., Parnichkun M. 2006. Online Self-Tuning Precompensation for a PID Heading Control of a Flying Robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 4(3): 323-330.
- Rajesh Rajamani. 2006. Vehicle Dynamics and Control[M]. America: Springer Verlag.
- Reddy R.N. Ellis J.R. 1981. Contribution to the Simulation of Driver-Vehicle-Road System. SAE Paper, No. 810513.
- Roman Prokop, Petr Husták, Zdenka Prokopová. 2002. Simple robust controllers: Design, tuning and analysis[J]. International Journal of Control: 905-921.
- Salami M., Cain G. 1995. An adaptive PID controller based on genetic algorithm processor[J]. Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, Conference Publication, 414: 12-14.
- Scott G.M., Shavlik J.W., Ray W.H. 1992. Refining PID controller using neural networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 4: 746-757.
- Segel L. 1956. Theoretical Prediction and Experimental Substantiation of the Response of the Automobile to Steering Control”, automobile division, The Institute of Mechanical Engineers: 26-46.
- Serrano F.J., Vidal A.R., Roriguez A. 1998. Generalizing CMAC architecture and training[J]. IEEE Trans Neural Networks, 9(6):1950-1964.
- Shladover, S.E., C.A. Desoer, J.K. Hedrick, M. Tomizuka, J. Walrand, W. Zhang, D.H. McMahon, H. Peng, S. Sheikholeslam, and N. McKeown. 1991. Automatic Vehicle Control Developments in the PATH Program[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 40(1): 431-438.
- Shoemaker, C.M. and J.A. Bomstein. 1998. Overview of the Demo III UGV Program[C]. In Part of the SPIE Conf. on Robotic and Semi-Robotic Ground Vehicle Technology, 202-211.
- Shoemaker, C.M. and J.A. Bomstein. 1998. Overview of the Demo III UGV Program[C]. In Part of the SPIE Conf. on Robotic and Semi-Robotic Ground Vehicle Technology: 202-211.

- Shumeet Baluja.1996. Evolution of an artificial neural network based autonomous land vehicle controller[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 26(3): 450-463.
- Sidhu, A., Mikesell, D.R., Guenther, D.A., Bixel, R., and Heydinger, G. 2007. Development and Implementation of a Path-Following Algorithm for an Autonomous Vehicle[R]. SAE Paper 2007-01-0815.
- Tao Mei, Huawei Liang, Bin Kong, Jing Yang, Hui Zhu, Bichun Li, Jiajia Chen, Pan Zhao, et al. 2012. Development of "Intelligent Pioneer" Unmanned Vehicle [C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium: 938-943.
- Thrun, S., M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Dievel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffman, K. Lau, C. Oakley, M. Palatucci, V. Pratt, P. Stang, S. Strohban, C. Dupont, L. Jendrossek, C. Koelen, C. Markey, C. Rummel, J. Niekirk, E. Jensen, P. Alessandrini, G. Bradski, B. Davies, S. Ettinger, A. Kaehler, A. Nefian, and P. Mahoney. 2006. Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge[J]. Journal of Field Robotics, 23: 661-692.
- Tohru Yoshioka, Tomohiko Adachi, Tetsuro Butsuen, Haruki Okazaki. 1999. Application of sliding-mode theory to direct yaw-moment control[J]. JSAE Review, 20(1999):523-529.
- Travis, W., R. Daily, D.M. Bevy, K. Knoedler, R. Behringer, H. Hemetsberger, J.Kogler, W. Kubinger, B. Alefs. 2006. SciAutonics-Auburn Engineering's Low-Cost High-Speed ATV for the 2005 DARPA Grand Challenge[J]. Journal of Field Robotics, 23:580-597.
- Trepagnier, P.G., J. Nagel, P.M. Kinney, C. Koutsougeras, and M.Dooner. 2006. KAT-5:Robust Systems for Autonomous Vehicle Navigation in Challenging and Unknown Terrain[J]. Journal of Field Robotics, 23:509-526.
- Visioli A. 2006. Practical PID Control[M]. Springer Verlag Advances in Industrial Control Series.
- Wai R.J. 2003. Tracking control based on neural network strategy for robot manipulator[J]. Neurocomputing, 51: 425-445.
- Wei Wang, Kenzo Nonami and Yuta Ohira. 2006. Model Reference Sliding Mode Control of Small Helicopter X.R.B based on Vision[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 5(3): 233-242.
- Werling, M. & Groll, L. (2008). Low-level controllers realizing high-level decisions in an autonomous vehicle[C]. In IEEE Transactions on Intelligent Vehicles Symposium: 1113-1118.
- Whitcomb D. W., Milliken W. F., 1956. Design Implications of a General Theory of Automobile Stability and Control[J]. automobile division, The Institute of Mechanical Engineers: 83-107.
- Wit, J., C.D. Crane III, and D. Armstrong. 2004. Autonomous Ground Vehicle Path Tracking[J].

- Journal of Robotic Systems, 21: 439-449.
- Wonslaik Chee & Masayoshi Toraizuka. 1994. Vehicle Lane Change Maneuver in Automated[J]. Highway Systems, 10: 192-196.
- Wu, S. J., Chiang, H. H., Perng, J. W., Lee, T. T. & Chen, C. J. (2005). The automated lane-keeping design for an intelligent vehicle[C]. In Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium: 508-513.
- Yoshikazu, H., Eiichi, O. and Shigeyuki, H. 2005. Optimum Vehicle Trajectory Control for Obstacle Avoidance Problem[C]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1: 367-372.
- Yung-Hsiang, J. H. and Gerdes, J. C. 2005. Stabilization of steer-by-wire vehicle at the limits of handling using feedback linearization[J]. Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE).
- Zhijun Li, Weidong Chen, Hong Liu. 2008. Robust Control of Wheeled Mobile Manipulators Using Hybrid Joints[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 5(1): 83-90.
- 安部正人, 陈辛波. 1998. 汽车的运动和操纵[M]. 机械工业出版社.
- 蔡自兴. 2004. 智能控制(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社.
- 丛爽, 郑毅松. 2003. 几种局部连接神经网络结构及性能的分析与比较[J]. 计算机工程, 29(12): 11-13.
- 丛岩峰. 2011. 高速公路环境中自动驾驶车辆运动规划与控制[D]:[博士]. 吉林: 吉林大学.
- 傅京孙, 蔡自兴, 徐光佑. 2003. 人工智能及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社.
- 高振海, 管欣, 李谦, 等. 2002. 基于预瞄跟随理论的驾驶员跟随汽车目标速度的控制模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 32(1): 1-5.
- 管欣, 张素民, 高振海, 等. 2010. 利用七自由度车辆模型估计汽车状态参数[J]. 科学技术与工程, 10(16): 3888-3892.
- 郭孔辉. 1991. 汽车操纵动力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社.
- 贺玉龙, 卢仲贤, 马国雄, 刘小明, 任福田. 2002. 高速公路直线段车辆稳定运行速度模型[J]. 公路, 2002(10): 99-103.
- 李淼. 2009. 基于滚动时域的车辆速度估计[D]:[硕士]. 长春: 吉林大学.
- 欧青立, 何克忠. 2000. 室外智能移动机器人的发展及其关键技术研究[J]. 机器人, 2000(6): 519-525.
- 全永桑. 1989. 城市交通控制[M]. 北京: 人民交通出版社.
- 任殿波, 张继业, 张京明, 等. 智能车辆弯路换道轨迹规划与横摆率跟踪控制[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(3): 306-31
- 孙增圻, 等. 1997. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社.

- 王荣本, 张荣辉, 储江伟, 等. 2007. 区域交通智能车辆控制器优化设计和品质分析[J]. 农业机械学报, 38 (1): 22-25.
- 王顺晃, 舒迪前. 2005. 智能控制系统及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社.
- 王威, 杨平. 2008. 智能PID控制方法的研究现状及应用展望[J]. 自动化仪表, 2008(10): 86-92.
- 王仲民. 2006. 移动机器人路径规划及轨迹跟踪问题研究[D]:[博士]. 河北工业大学.
- 文国玮. 2005. 城市交通与道路系统规划[M]. 北京: 清华大学出版社.
- 徐士良. 2005. 计算机软件技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社.
- 徐友春, 王荣本等. 2001. 世界智能车辆近况综述[J]. 汽车工程, 2001(5): 289-295.
- 严蔚敏, 吴伟民. 1996. 数据结构: C语言版[M]. 北京: 清华大学出版社.
- 杨得军. 1997. 汽车驾驶模拟器操作触感模拟系统的开发与建模[D]:[硕士]. 吉林: 吉林工业大学.
- 游峰. 2005. 智能车辆自动换道与自动超车控制方法的研究[D]:[博士]. 吉林大学.
- 喻凡. 2004. 车辆动力学及其控制[M]. 人民交通出版社.
- 张殿业, 明士军, 石茂清. 2003. 中国道路交通安全问题探讨[J]. 交通运输工程与信息学报, 1(2): 1722.
- 张荣辉. 2007. 视觉引导区域交通智能车辆 cybercar 导航控制器设计[D]:[硕士]. 长春: 吉林大学.
- 冢田幸广. 2007. ITS 最近的动向[A]. 日本国土交通省. 第 22 届中日公路交流会议资料集[C]. 北京: 日本国土交通省.

致谢

本文是在导师梅涛研究员的悉心指导下完成的,在此向我的老师表示最真诚的感谢!在五年的研究生生涯中,梅老师在学习、科研和生活等方面都给予了我详尽的指导、无私的关怀和鼓励,梅老师深厚的学术造诣、严谨的治学风格、严肃的科学态度、诲人不倦的崇高师德和平易近人的作风深深地令我折服。尤其是他渊博的学识、敏锐的思维方式,为我论文的选题、撰写提供了关键启发和帮助。值此论文完成之际,再次衷心感谢导师五年来对学生的巨大关心、教导与帮助!

在这五年的科研工作及撰写论文期间,中国科学院先进制造技术研究所的梁华为、宋彦、祝辉、黄健、李碧春、许铁娟、陶祥、韦虎、刘伟及各位老师给我提供了良好的科研环境和热心的帮助;同时,要衷心感谢陈佳佳、张卫忠、王俊、唐国明、袁胜及其他所有师兄姐妹们,几年来与大家在工作与生活中的交流、讨论,让我获益良多。衷心感谢我的父母,是他们的多年来辛勤的劳作、悉心的培养和多年来他们对我的一贯支持与鼓励让我在人生的道路上不断的前进。

最后感谢所有支持、关心、鼓励和帮助过我的师长、朋友和家人。

在读期间发表的学术论文与取得的研究成果

已发表论文:

[1] Pan Zhao, Jiajia Chen, Tao Mei and Huawei Liang. Dynamic Motion Planning for Autonomous Vehicle in Unknown Environments. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2011: 284–289.

[2] Pan Zhao, Jiajia Chen, Yan Song, Xiang Tao, Tiejuan Xu, Tao Mei . Design of Control System for an Autonomous Vehicle Based on Adaptive-PID. International Journal of Advanced Robotic Systems, 9(44), 2012.

研究成果:

作者参加国家自然科学基金重大计划重点项目(编号 91120307), “面向城区综合环境的无人驾驶车辆关键技术及平台”, 负责无人驾驶车辆控制系统算法设计, 项目组参加基金委举办的“中国智能车未来挑战赛”, 获得成绩:2010 年第一名, 2011 年第三名。